

ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА
ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ГЕОЭКОЛОГИЯ
ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

*Научно-методический журнал
Издается с октября 2001 г.*

Периодичность – 4 раза в год

2(31) 2011

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

БЕЛОКОНЬ В. М., ЛУКЬЯНЧИКОВ И. А., ДОНДО Д. А. Движение капель расплавленного электродного металла при сварке в CO ₂	6
ГАЛЮЖИН А. С. Математическая модель движения частицы воды в силовом поле центробежно-магнитного влагоотделителя.....	13
ГАРЛАЧОВ Н. С., АНТОНОВА Е. Н. Оснастка для пневмоцентробежной обработки отверстий	22
ГОБРАЛЕВ Н. Н., ИЛЬЮШИНА Е. В. Инженерная графика: форма изложения и содержание конспекта.....	29
ЕМЕЛЬЯНОВ С. Н., ПОПКОВСКИЙ В. А., КАТЬКАЛО А. А., КОРОТЕЕВ А. О. О выборе пара- метров режима при контактной точечной сварке оцин- кованных сталей с сохранением покрытия	34

КАПИТОНОВ А. В. Показатели точности и допуски планетарных роликовых передач	41
КАРТАШЕВИЧ А. Н., БЕЛОУСОВ В. А., ТОВСТЫКА В. С. Изменение экономических и экологических показателей трактора в зависимости от режима его работы при использовании смесевых топлив	49
КРУЧЕК А. С. Развитие системы нормирования требований безопасности, предъявляемых к транспортным средствам, находящимся в эксплуатации	57
ЛОВШЕНКО Ф. Г., ЛОВШЕНКО Г. Ф., ХИНА Б. Б., ФЕДОСЕНКО А. С. Расчет максимальных концентраций реагирующих компонентов в шихте, подвергаемой реакционному механическому легированию	64
НОВИКОВ В. А., СКРЯБИНА Г. И., ШИЛОВ А. В., КУШНЕР А. В. Перспективные направления магнитографической дефектоскопии в машиностроении	76
РЯЗАНЦЕВ А. Н. Автоматизированный синтез структурных моделей для решения логических задач выбора в САПР технологических процессов	87
САЗОНОВ И. С., КИМ В. А., АМЕЛЬЧЕНКО Н. П., БИЛЫК О. В., ЯСЮКОВИЧ Э. И., ЛИННИК Д. А. Способ повышения эффективности линейной виброзащитной системы водителя колесного трактора	96
САЛБИЕВА З. С., ЛЬЯНОВ М. С., САЗОНОВ И. С., АМЕЛЬЧЕНКО П. А. Изменение частотных характеристик маятникового датчика стабилизации остова склонохода	100
ТАРАСИК В. П., РЫНКЕВИЧ С. А. Метод оперативного диагностирования гидромеханической передачи автомобиля на режиме гностического пробега	104
ХАТЕТОВСКИЙ С. Н., ГРОМЫКО П. Н., ПАВЛОВИЧ М. С. Обеспечение нечувствительности цевочной передачи к погрешностям монтажа	113
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	
СЕЛИВАНОВ В. А. К вопросу построения быстродействующих систем электропривода	122

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

- БОСАКОВ С. В., БЕЛЕВИЧ В. Н., ЩЕТЬКО Н. С.**
Теоретические исследования по определению положения наклонной трещины в приопорной зоне преднапряженных плит безопалубочного формирования 127
- СЕМЕНЮК С. Д., БЕРЕЗОВСКИЙ С. Н., ТЕРЕЩЕНКО А. Н.** Рациональная и эффективная разработка нерудных строительных материалов (песок, гравий) в карьерах Могилевской области для строительства и ремонта автодорог..... 134

ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

- ГАЛЮЖИН С. Д., ПУСКОВА В. М., РУЦКИЙ М. И.**
Анализ несчастных случаев при штамповке листового металла..... 141

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

- КРУПЕНЬКО Т. Л., ШИРОЧЕНКО В. А.** Методика максимизации прибыли торгового предприятия..... 150
- НЕЧАЕВА Т. Г., КОМАРОВА С. Л., САКОВИЧ Д. Д.**
Оценка конкурентоспособности строительных материалов 158

-
- Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам
 - Публикуемые материалы рецензируются
 - Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00014
для предприятий и организаций – 000142

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

BELOKON V. M., LUKIANCHIKOV I. A., DONDA D. A. Pressure of melted electrode drops in CO ₂ welding.....	6
GALIYZHIN A. S. Mathematical model of movement of a particle of water in a field of force of the centrifugal-and-magnetic moisture separator	13
GARLACHOV N. S., ANTONOVA E. N. Equipment for processing holes pneumocentrifugal.....	22
GOBRALYOV N. N., ILYUSHINA E. V. Engineering graphics: the way of presentation and compendium content.....	29
EMELJANOV S. N., POPKOVSKY V. A., KATKALO A. A., KOROTEYEV A. O. About the choice of mode parameters at resistance spot welding of zinc-coated steels with covering preservation.....	34
KAPITONOV A. V. Accuracy indicators and tolerances for planetary roller drives.....	41
KARTASHEVIC A. N., BELOUSOV V. A., TOVSTYKA V. S. Change economic and ecological Indicators of work of a tractor depending on a mode of its work at use mixed fuels.....	49
KROUTCHEK A. S. Development the valuation of safety requirements for vehicle in use.....	57
LOVSHENKO F. G., LOVSHENKO G. F., KHINA B. B., FEDOSENKO A. S. Calculation of the maximum concentration of reacting components in the charge under reactionary mechanical alloying.....	64
NOVIKOV V. A., SKRYABINA G. I., SHILOV A. V., KUSHNER A. V. Perspective directions of magnetic tape testing in mechanical engineering	76
RJAZANCEV A. N. The structural models automated synthesis for choice logical problems solution in computer-aided processes planning systems.....	87
SAZONOV I. S., KIM V. A., AMELCHENKO N. P., BILIK O. V., YASUKOVICH E. I., LINNIK D. A. The way to increase the efficiency of linear vibroprotective system of the wheeled tractor driver.....	96

SALBIEVA Z. S., LUKYANOV M. S., SAZONOV I. S., AMELCHENKO P. A. Change of frequency characteristics of swing sensor of stabilization of hillside tractor wreck.....	100
--	-----

TARASIK V. P., RYNKEVICH S. A. The method of operative diagnostic of the hydromechanical transmission of the track on mode of the cognitive run motion	104
---	-----

KHATETOVSKY S. N., GROMYKO P. N., PAVLOVICH M. S. Support of pin gear insensitivity to assembly errors.....	113
--	-----

ELECTRICAL ENGINEERING

SELIVANOV V. A. On the question of constructing high-speed electric drive systems.....	122
---	-----

CIVIL ENGINEERING. ARCHITECTURE

BOSAKOV S. V., BELEVICH V. N., SHCHETKO N. S. Theoretical researches on definition of the inclined crack position in the bysupporting zone of stressed plates of the off-form molding.....	127
---	-----

SEMENUK S. D., BEREZOVSKY S. N., TERESHCHENKO A. N. Rational and effective working out of nonmetallic building materials (sand, gravel) for building and repair of motorways in open-cast mines of the Mogilev area.....	134
---	-----

LABOUR PROTECTION. ENVIRONMENT PROTECTION. GEOECOLOGY

HALIUZHYN S. D., PUSKOVA V. M., RUTSKIY M. I. The analysis of accidents at punching of sheet metal.....	141
--	-----

ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

KRUPENKO T. L., SHIROCHENKO V. A. Technique of profit maximization of trade enterprise.....	150
--	-----

NECHAEVA T. G., KOMAROVA S. L., SAKOVICH D. D. Competitiveness estimation of building materialst	158
---	-----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.791

В. М. Белоконь, канд. техн. наук, доц., И. А. Лукьянчиков, Д. А. Дондо

ДВИЖЕНИЕ КАПЕЛЬ РАСПЛАВЛЕННОГО ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ В CO₂

Статья посвящена основному недостатку сварки плавлением в углекислом газе – разбрызгиванию электродного металла. Описано в математической форме движение капель из зоны дуги. Получены уравнения, определяющие траекторию, длину и время полета капель до поверхности свариваемых деталей. Доказано теоретически и экспериментально, что наибольшую длину и время полета имеют капли, вылетающие из зоны сварки под углом 45 град. Максимальная длина полета капель средней и большой величины составляет 100...110 мм. Результаты исследований позволили определить необходимое количество нанесения защитных покрытий, затрудняющих налипание жидких капель на поверхности свариваемых деталей.

Изготовление сварных конструкций в большинстве случаев связано со сваркой плавящимся электродом в защитных газах. Наиболее прогрессивной является сварка в защитном газе аргоне. Данный способ сварки характеризуется малыми потерями электродного металла (1...3 %); в основном это потери на испарение. Имеются и другие преимущества. Недостатком считается высокая стоимость аргона.

Снижает себестоимость защитного газа добавка в аргон углекислого газа. При этом процесс близок к сварке в аргоне, но кроме испарения металла происходит разбрызгивание. Потери составляют 3...5 % электродного металла. Этот способ сварки находит все более широкое применение. Однако из-за организационных и других причин распространение сдерживается. В результате на многих предприятиях применяется хорошо освоенная сварка плавящимся электродом в среде углекислого газа. Наряду с серьезными потерями электродного металла (в среднем 10 %), имеет место необходимость в удалении налипающих на поверхность свариваемых деталей брызг. Дополнительно затрачивается до 8...10 мин ручного труда

на удаление их с поверхности 1 м шва. Снизить трудозатраты возможно применением и нанесением перед сваркой защитных покрытий [1]. В этом случае необходимо знать ширину участка налипания брызг, расход защитного покрытия.

Капли электродного металла переходят в сварочную ванну (что характерно большинству из них) или вылетают из зоны сварки. В последнем случае их называют брызгами.

Пространство вокруг сварочной дуги в поперечном сечении при сварке без коротких замыканий разделяется на три зоны. На рис. 1 представлено поперечное сечение зон в виде схемы.

Первая зона характеризуется тем, что через нее пролетают брызги, часть из которых имеет наибольшую длину полета. Вторая зона – это зона, через которую в большинстве своем пролетают брызги, оседающие вблизи шва. Третья зона – это зона, через которую пролетают капли в сварочную ванну. Следует отметить, что часть капель металла попадает в сварочную ванну и из первой, и из второй зоны.

Рассмотрение иных сечений через дугу, отличных от показанных на рис. 1,

показывает лишь на увеличение количества брызг на поверхность металла, увеличение числа капель, попадающих в

сварочную ванну, но не на увеличение ширины участка налипания вдоль шва.

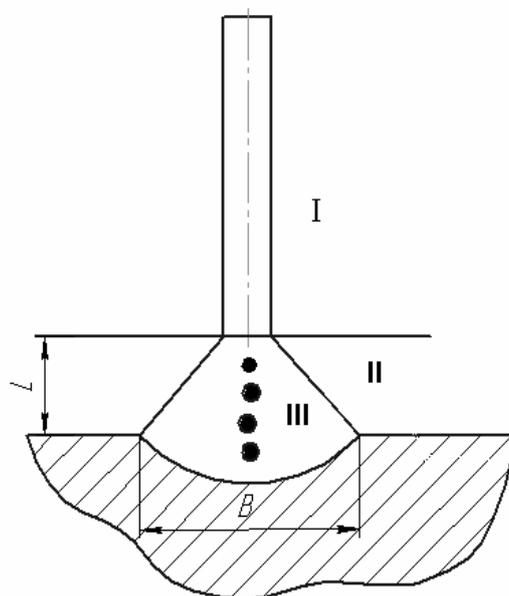


Рис. 1. Схема зон пространства вокруг дуги: I, II, III – зоны околосварочного пространства; L – длина дуги; B – ширина шва

Для определения кинематики движения капли (брызги) расплавленного металла поперек шва массой m и радиусом R , длины полета средних и больших капель, проходящих через зону

I с углом вылета к горизонту α и начальной скоростью v_a , рассмотрим схему, представленную на рис. 2.

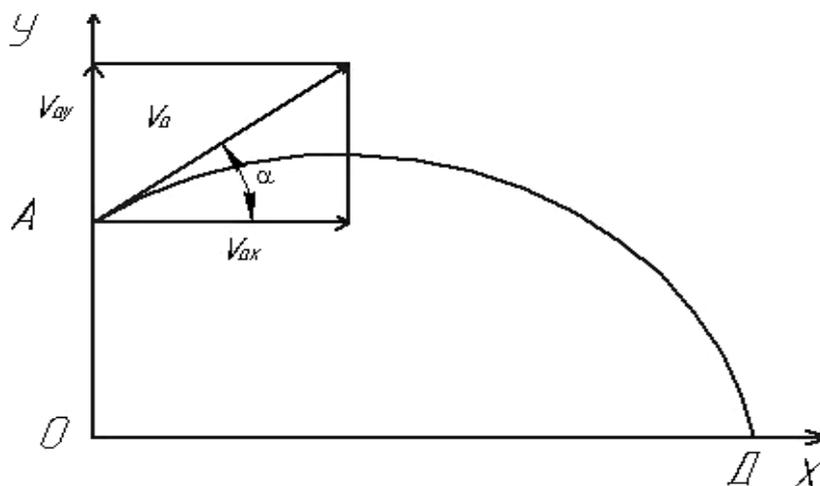


Рис. 2. Схема полета капли (брызги) электродного металла в зоне I

Скорость полета капле электроодного металла в начальный момент определены в [2].

Сопротивлением воздуха из-за его небольшого значения пренебрегаем.

На рис. 2 начало координат 0 совпадает с поверхностью сварочной ванны. Точкой вылета является точка А на оси ОУ, отрезок ОА соответствует длине дуги L. Точка Д на оси ОХ соответствует месту падения капли (брызги) на поверхность свариваемого металла. v_{ay} и v_{ax} – вертикальная и горизонтальная составляющие скорости v_a .

Начальные условия движения:

$$t_a = 0; \quad X_0 = 0; \quad Y_0 = L;$$

$$v_{ax} = v_a \cdot \cos \alpha;$$

$$v_{ay} = v_a \cdot \sin \alpha.$$

Дифференциальные уравнения движения капли (брызги) под действием постоянной по модулю и направлению силы тяжести G:

$$m\ddot{x} = \sum x_i = 0;$$

$$m\ddot{y} = \sum y_i = -G = -mg,$$

где g – ускорение свободного падения.

Проекция ускорения капли из этих уравнений:

$$\ddot{x} = 0; \quad \ddot{y} = -g.$$

Проинтегрируем дважды по времени t дифференциальные уравнения движения капли (брызги) вдоль оси ОХ:

$$\dot{x} = v_{ax} = c_1; \quad (1)$$

$$x = c_1 t + c_2. \quad (2)$$

Для определения постоянной интегрирования (c_1 и c_2) подставим в уравнение (1) проекцию начальной скорости $v_a = \dot{x} = v_a \cdot \cos \alpha$, получим $c_1 = v_a \cdot \cos \alpha$,

Подставив в уравнение начальные условия ($t_a = 0$; $x_0 = 0$), получим

$$\dot{x} = v_{ax} = v_a \cdot \cos \alpha; \quad (3)$$

$$x = v_a \cdot t \cdot \cos \alpha. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) показывают, что проекция скорости капли (брызги) на горизонтальную ось постоянна и горизонтальное перемещение совершается по закону равномерного движения со скоростью

$$v_{ax} = v_a \cdot \cos \alpha.$$

Проинтегрируем дважды по времени t дифференциальное уравнение $\ddot{y} = -g$, получим

$$\dot{y} = -gt + c_3; \quad (5)$$

$$y = -\frac{gt^2}{2} + c_3 t + c_4. \quad (6)$$

Подставим в уравнение (5) начальные условия ($t_0 = 0$; $y_a = v_a \sin \alpha$), тогда $c_3 = v_a \sin \alpha$.

Из уравнения (6) при $t_0 = 0$; $y_a = L$ получим $c_4 = L$.

При найденных значениях c_3 и c_4 выражения (5) и (6) примут вид:

$$v_{ay} = \dot{y} = v_a \cdot \sin \alpha - gt; \quad (7)$$

$$y = v_a \cdot t \cdot \sin \alpha - \frac{gt^2}{2} + L. \quad (8)$$

Определим время из формулы (4) и, подставив его в уравнение (8), получим уравнение траектории

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_a^2 + \cos^2 \alpha} + L. \quad (9)$$

Траектория движения капли представляет собой параболу с вертикальной осью.

Скорость движения капли по траектории

$$v = \sqrt{v_{ax}^2 + v_{ay}^2} = \sqrt{(v_a \cdot \cos \alpha)^2 + (v_a \sin \alpha + gt)^2}. \quad (10)$$

Движение капли (брызги), полученное сложением равномерного и равномерного вертикального движения, не является равномерным.

Определим дальность и продолжительность полета капли.

В точке Д падения капли (см. рис. 2) на поверхность металла $y = 0$, тогда (уравнение (8))

$$v_a \cdot t \cdot \sin \alpha - \frac{gt^2}{2} + L = 0.$$

Время от вылета до падения

$$t_n = \frac{v_a \cdot \sin \alpha + \sqrt{v_a^2 \cdot \sin^2 \alpha + 2gL}}{g}. \quad (11)$$

Дальность полета определим, подставив значение t_a в уравнение (4):

$$L_n = x = v_a \cos \alpha \times \frac{(v_a \cdot \sin \alpha + \sqrt{v_a^2 \cdot \sin^2 \alpha + 2gL})}{g}. \quad (12)$$

При сварке с короткими замыка-

ниями разлет капель металла в основном происходит в момент короткого замыкания. Для этого случая с очень небольшой погрешностью может быть принято $y = L = 0$. Тогда выражения (11) и (12) примут вид:

$$t_n = \frac{2v_a \cdot \sin \alpha}{g}; \quad (13)$$

$$L_n = \frac{v_a^2}{g} \cdot \sin 2\alpha. \quad (14)$$

Применительно к брызгам среднего и крупного размера проведем расчеты времени и длины полета. Результаты расчета сводим в табл. 1. Длина дуги принята равной 6 мм.

Результаты расчета показывают, что удаление брызг от шва средних (диаметром 0,8...1,0 мм), крупных (диаметром до 2,5 мм и более) дуг при оптимальных режимах сварки составляет 100...110 мм. Это подтверждают эксперименты; их результаты приведены в [5].

Табл. 1. Время и длина полета средних и крупных брызг при сварке без коротких замыканий

α , град	10		20		30		40		45	
v_a , м/с	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0
L_n , мм	49	34,8	59	65,6	79,5	88,4	90,4	100,4	101	102
t , с	1,06	3,54	2,09	6,98	3,06	10,2	3,94	13,12	4,33	14,4

Время и длина полета брызги незначительно зависят от длины дуги. Чем больше длина дуги, тем больше и длина, и время полета (на 0,5...1,5 %); в этом отличие сварки без коротких замыканий от сварки с короткими замыканиями.

Результаты расчетов длины и времени полета брызг, образовавшихся при коротком замыкании капля-сварочная ванна, приведены в табл. 2.

Для определения характера движения капель через зону II (см. рис. 1) рассмотрим схему, представленную на

рис. 3.

Обозначения на рис. 3 соответствуют обозначениям на рис. 2.

Определим траекторию полета брызг во второй зоне, рассмотрев и решив дифференциальные уравнения (как и для зоны I) или положив в формулах (11) и (12) отрицательные значения угла α . Тогда время полета

$$t_{n2} = \frac{(-v_a \cdot \sin \alpha) + \sqrt{v_a^2 \cdot \sin^2 \alpha + 2gL}}{g}. \quad (15)$$

Табл. 2. Время и длина полета каплей, образовавшихся при коротком замыкании капля – сварная ванна

α, град	10		20		30		40		45	
v _а , м/с	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0
L _п , мм	40,5	34,5	58,4	64	77	86	90	99	100	101
t, с	1,0	3,2	2,1	6,9	3	10,1	3,9	12,6	4,0	14,3

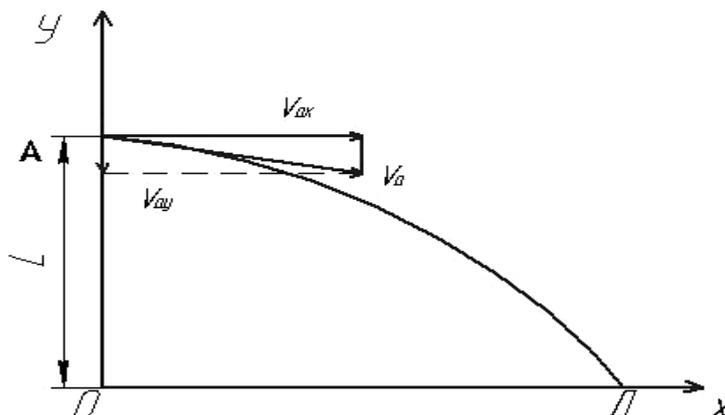


Рис. 3. Схема полета каплей (брызг) электродного металла в зоне II

Длина полета

$$L_{n2} = v_a \cdot \cos \alpha \times \frac{(-v_a \cdot \sin \alpha) + \sqrt{v_a^2 \cdot \sin^2 \alpha + 2gL}}{g}. \quad (16)$$

Применительно к зоне III (электродный металл в виде каплей и частично паров переносится в сварочную ванну) в формуле (15), предположив, что $\alpha = 90^\circ$, получим наименьшее время полета капли до сварочной ванны

$$t = \sqrt{\frac{2L}{g}}. \quad (17)$$

Действительное минимальное время полета каплей будет несколько иным. В формуле (17) не учтено действие сил (магнитных, реактивных и др.), действующих на каплю при её полете через дугу. Погрешность составляет 10...20 % в зависимости от режима сварки.

Размером в поперечном сечении

зоны III является ширина шва. Ширину шва можно определить на основании тепловых расчетов. Основой для расчета являются режимы сварки, температура плавления металла. Температура плавления металла определяет поперечную границу зоны III.

Угол разлета каплей в зоне III приблизительно равен $\arctg \frac{B}{2L}$, где B – ширина шва.

Для коротких дуг ($0 < L < 8$ мм) напряжение на дуге определяется зависимостью

$$U_g = a + BL, \quad (18)$$

где a – суммарное падение напряжения на аноде и катоде, для токов 50...250 А $a = 17...19$ В [3]; B – падение напряжения на единицу длины дуги, $B = 2,3...2,7$ В/мм [3].

Из выражения (18)

$$L = \frac{U_g - a}{B}.$$

В табл. 3 приведены расчеты длины дуги для оптимальных режимов

стыковых соединений.

Табл. 3. Значения длины дуги при оптимальных режимах сварки

Толщина металла, мм	Диаметр проволоки, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение, В	L, мм
2	1,0...1,2	180...250	22...26	1,6
4	1,2...1,6	290...350	23...32	3,6

Во всех случаях направление полета капля имеет случайный характер. Как теоретическим, так и опытным путем определено, что капли разбрызгиваются во всех направлениях и образуют объект, который следует удалять после сварки вдоль шва. Капли, падающие впереди дуги, попадают на непрогретый металл и не образуют прочного соединения. В опытах после обрыва дуги брызги до кратера удалялись с трудом, после него – относительно легко. Кроме всего прочего, часть капель, падающих впереди, при сварке переваривается.

Капли, имеющие траекторию полета с малыми скоростями полета, перемещаются в сторону, противоположную направлению сварки, попадают в сварочную ванну и кристаллизуются вместе с ней. Лишь капли, попадающие на швы, границу ванны и далее от нее, образуют брызги.

При относительно ровном разбрызгивании во все стороны и при движущемся источнике нагрева равномерное покрытие поверхностей брызгами на расстоянии от шва более 70 мм не наблюдается. Наибольшее количество брызг имеет место на полосе 60...70 мм от центра шва. Это соответствует сектору, наиболее густо перекрытому возможными траекториями полета и падения капля из зоны I и II, частично из зоны III.

Как показали расчеты и эксперименты, брызги, имеющие наибольшую длину полета, вылетают из зоны сварки

под углом примерно 45° к поверхности свариваемых деталей. Мелкие капли размером примерно 0,02 мм вылетают из области сварки с большой скоростью (около 40 см/с). Угол между направлением их полета и перпендикуляром к поверхности свариваемых деталей обычно не превышает 25° [2].

Капли размером 0,1...0,2 мм, как и очень мелкие (размером 0,02 мм), разлетаются на большие расстояния от шва, охлаждаются во время полета до температуры ниже температуры плавления. Они покрываются пленкой окиси при полете за зоной защитного газа в атмосфере воздуха и практически не имеют прочного сцепления с поверхностью свариваемых деталей. Как правило, проблем с удалением таких брызг не существует.

Мелкие брызги и пары металла покрывают внутреннюю поверхность сопел сварочных горелок. Прочного соединения брызг и паров с соплом не наблюдается, т. к. сопло изготавливается из медных сплавов и иногда дополнительно охлаждается. Наблюдается механическое сцепление, которое может быть существенно снижено нанесением защитных покрытий.

Наиболее распространенные и применяемые покрытия на производстве описаны в [1]. Количественный расчет расхода некоторых покрытий на основе исследований и сведений авторов приведен в [4–6]. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Табл. 4. Средний расход защитных покрытий на защиту от налипания брызг околошовной зоны 1 м длины шва

Покрытие	КБЖ	МВ	АЖС	МЖС	ГЛЖ-94
Состав покрытия	Сульфидно-спиртовая барда – 100 г, вода – 1000 г	Мел – 35 %, вода – 65 %	Алюминиевая пудра ПАК-1 – 50 г, жидкое стекло – 1000 г	Мел – 30 %, жидкое стекло – 70 %	Кремний – органическая жидкость
Расход, г	69	69	15	165	99

Расход защитного покрытия зависит от степени предварительной очистки поверхностей перед сваркой. При дробеструйной предварительной обработке поверхностей в состоянии поставки расход защитных покрытий примерно одинаков.

Выводы

1. Предложены математические зависимости для расчетного определения длины и времени полета капель (брызг) электродного металла при сварке плавлением в углекислом газе.

2. Расчетным и экспериментальным путями определена зона забрызгивания поверхностей свариваемых деталей вдоль шва.

3. Рассчитан расход некоторых распространенных покрытий для защиты поверхностей от налипания брызг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белоконь, В. М.** Покрытия для защиты поверхностей от налипания брызг при сварке / В. М. Белоконь, М. Н. Иванцов, М. О. Поморцева // Сварочные технологии и оборудование. – 2005. – № 2. – С. 23–27.
2. **Новожилов, Н. М.** Основы металлургии дуговой сварки в газах / Н. М. Новожилов. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.
3. **Потапьевский, А. Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А. Г. Потапьевский. – М.: Машиностроение, 1974. – 239 с.
4. Лакокрасочные покрытия / Под ред. Д. С. Чертфилда. – М.: Химия, 1968. – 640 с.
5. **Федько, В. Т.** Эффективность применения покрытий для защиты поверхностей от брызг при дуговой сварке / В. Т. Федько, А. М. Попков // Сварочное производство. – 1974. – № 10. – С. 39–40.
6. **Федько, В. Т.** Методика нормирования расхода покрытий для защиты поверхностей свариваемого металла при сварке в CO₂ / В. Т. Федько, К. И. Томас // Сварочное производство. – 1994. – № 4. – С. 20–22.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 24.02.2011

**V. M. Belokon, I. A. Lukianchikov,
D. A. Donda**
**Pressure of melted electrode drops
in CO₂ welding**

The paper is devoted to the main disadvantage of fusion welding in CO₂ i.e. electrode metal spattering. The movement of drops from arc zone is described in the mathematical form. The equation determining the length and time of the drops as the surface of the parts to be welded is obtained. It is shown theoretically and experimentally that the drops flying from arc zone at an angle of 45° have the largest length and longest time of flight. The maximum length of drop flight of an average and large size is 100...110 mm. The results of the research made it possible to determine the necessary quantity of protective coating which creates obstacles to sticking of liquid drops onto the surface of parts to be welded.

УДК 621.51

А. С. Галюжин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ВОДЫ В СИЛОВОМ ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-МАГНИТНОГО ВЛАГООТДЕЛИТЕЛЯ

Разработана математическая модель движения частицы воды в винтовом канале центробежно-магнитного влагоотделителя, позволяющая выбрать его основные параметры. Модель учитывает действие центробежной силы, сил Лоренца, тяжести и Кориолиса, а также силы сопротивления движению.

Введение

При движении сжатого воздуха в центробежно-магнитном влагоотделителе на первом этапе необходимо удалить капли воды, а также обеспечить максимальное сосредоточение ее микрочастиц (полимеров) на внешней стороне винтового канала, т. е. ближе к внутренней вертикальной стенке корпуса [1]. Это означает, что поток сжатого воздуха должен пройти некоторый путь по винтовому каналу до воздействия на него ультрафиолетового излучения. На втором этапе после облучения поток сжатого воздуха также некоторое время должен двигаться по винтовому каналу до тех пор, пока ионизированные частицы воды не достигнут вертикальной стенки и не соединятся с тонким слоем воды, образованным ее каплями, ранее достигшими этой стенки.

Для определения необходимой длины пути или времени движения потока сжатого воздуха на первом и втором этапах, а также для оптимизации основных размеров винтового канала необходимо разработать математическую модель движения частицы воды в силовом поле влагоотделителя вместе с потоком сжатого воздуха.

Основная часть

При составлении модели были сделаны следующие допущения:

– частица жидкости есть материальная точка постоянной массы и во время движения принимает обтекаемую форму;

– движение сжатого воздуха в винтовом канале является стационарным;

– воздушный поток находится в диссипативном изотермическом стационарном силовом поле с наличием силового возмущения;

– диссипативность характеризуется суммарной силой сопротивления;

– силовое возмущение характеризуется суммарной вынуждающей силой.

Составим расчетную схему (рис. 1). На рис. 1 $O_a X_a Y_a Z_a$ – базовая (абсолютная) система координат; $OXYZ$ – подвижная система координат, условно скрепленная с воздушным потоком и совершающая вращательное движение с угловой скоростью ω_e и поступательное движение вниз со скоростью V_n . Основное уравнение движения материальной точки (частицы жидкости) с учетом допущений имеет вид [2, с. 237–255]:

$$m \vec{a} = \vec{G} + \vec{F}_u + \vec{F}_l + \vec{F}_k + \vec{F}_c, \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг; \vec{a} – ускорение частицы воды в подвижной системе координат, м/с²; \vec{G} – сила тяжести, Н; \vec{F}_u – центробежная сила инерции, Н; \vec{F}_l – сила Лоренца, Н; \vec{F}_k – сила Кориолиса, Н; \vec{F}_c – сила сопротивления, Н.

Сила тяжести и центробежная сила инерции определяются по известным формулам:

$$\vec{G} = m \vec{g}, \quad (2)$$

где \vec{g} – ускорение свободного падения, м/с²;

$$\vec{F}_y = -\vec{a}_y m, \quad (3)$$

где \vec{a}_y – центростремительное ускорение, м/с².

Поскольку подвижная система координат совершает вращательное движение с угловой скоростью ω_e , то удобнее модуль центробежной силы инерции представить зависимостью [2, с. 365–369]

$$F_y = m \omega_e^2 r, \quad (4)$$

где ω_e – угловая скорость, характеризующая вращательное движение частицы воды вместе с потоком воздуха, с⁻¹; r – радиус, равный расстоянию по нормали от оси влагоотделителя до частицы жидкости, м.

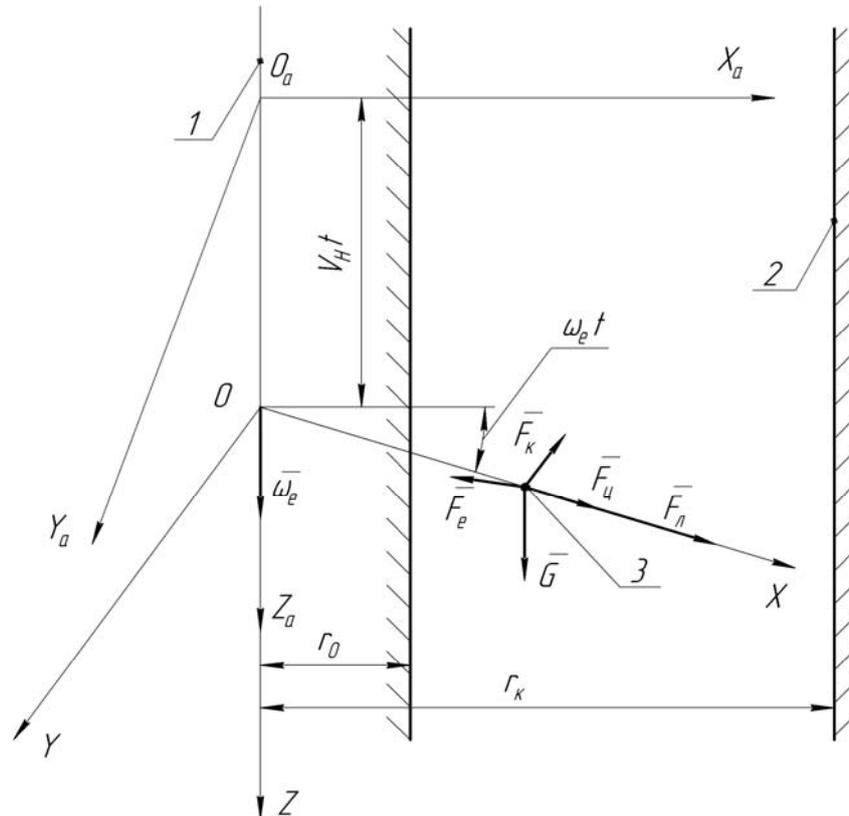


Рис. 1. Схема сил, действующих на заряженную частицу, движущуюся в канале центробежно-магнитного влагоотделителя: 1 – ось влагоотделителя; 2 – вертикальная стенка корпуса; 3 – заряженная частица

Силу Лоренца определим по формуле [3, с. 54–55]

$$\vec{F}_л = q [\vec{V}_0, \vec{B}], \quad (5)$$

где \vec{V}_0 – линейная (окружная) скорость движения частицы, м/с; \vec{B} – индукция магнитного поля, Тл; q – электрический заряд, Кл.

Модуль силы Лоренца также представим зависимостью от ω_e

$$F_л = q \omega_e r B. \quad (6)$$

Когда частица жидкости под воздействием F_y и $F_л$ начинает двигаться относительно потока воздуха, то возникает сила Кориолиса, которая определяется зависимостью [4, с. 200–204]

$$\vec{F}_к = 2m [\vec{\omega}_e, \vec{V}_r], \quad (7)$$

где \vec{V}_r – скорость движения частицы воды относительно потока воздуха, м/с.

Если размеры частицы жидкости на несколько порядков больше размеров молекул воздуха (назовем ее макрочастицей воды), то для определения силы F_c используют теорию аэродинамики. В этом случае физическая сущность силы сопротивления F_c представляет собой суммарное сопротивление при обтекании макрочастицы потоком воздуха. Для определения данной силы используют формулу, структура которой была предложена Ньютоном [5, с. 255–257; 6, с. 133–136]. Тогда

$$\vec{F}_c = -0,5k_c S_c \rho_{сж} |\vec{V}_r| \vec{V}_r, \quad (8)$$

где k_c – коэффициент лобового сопротивления; S_c – площадь проекции макрочастицы воды на плоскость, перпендикулярную вектору V_r , м²; $\rho_{сж}$ – плотность сжатого воздуха, кг/м³.

Подставим значения сил из уравнений (2)...(8) в уравнение (1) и спроецируем полученное уравнение на оси XYZ. При этом сделаем допущение, что составляющие \dot{y} и \dot{z} относительной скорости движения частицы относительно потока воздуха пренебрежительно малы по сравнению с составляющей \dot{x} . Поэтому при расчете F_l и F_k учитываем только \dot{x} . Тогда система дифференциальных уравнений движения макрочастицы в винтовом канале влагоотделителя при $x \geq r_0 \geq 0$ и $\dot{x} \geq 0$ примет вид:

$$\begin{cases} m \ddot{x} = m \omega_e^2 x + q \omega_e B x - 0,5k_c S_c \rho_{сж} \dot{x}^2; \\ m \ddot{y} = -2m \omega_e \dot{x} - 0,5k_c S_c \rho_{сж} \dot{y}^2; \\ m \ddot{z} = m g - 0,5k_c S_c \rho_{сж} \dot{z}^2 \end{cases} \quad (9)$$

или

$$\begin{cases} \ddot{x} = (\omega_e^2 + q \omega_e B / m) x - (0,5k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{x}^2; \\ \ddot{y} = -2\omega_e \dot{x} - (0,5k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{y}^2; \\ \ddot{z} = g - (0,5k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{z}^2. \end{cases} \quad (10)$$

Для удобства решения системы (10) обозначим:

$$A_1 = \omega_e^2 + q \omega_e B / m;$$

$$A_2 = 0,5k_c S_c \rho_{сж} / m; \quad B_1 = 2\omega_e. \quad (11)$$

Тогда система (10) примет вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = A_1 x - A_2 \dot{x}^2; \\ \ddot{y} = -B_1 \dot{x} - A_2 \dot{y}^2; \\ \ddot{z} = g - A_2 \dot{z}^2. \end{cases} \quad (12)$$

С помощью замены $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}_1$, $y_1 = y$, $y_2 = \dot{y}_1$, $z_1 = z$, $z_2 = \dot{z}_1$ в общем случае система (12) сводится к системе дифференциальных уравнений Риккати первого порядка вида

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = A_1 x_1 - A_2 x_2^2; \\ \dot{y}_1 = y_2; \\ \dot{y}_2 = -B_1 x_2 - A_2 y_2^2; \\ \dot{z}_1 = z_2; \\ \dot{z}_2 = g - A_2 z_2^2. \end{cases} \quad (13)$$

Известно, что дифференциальное уравнение Риккати интегрируется в квадратурах только в частных случаях, а системы дифференциальных уравнений Риккати могут быть решены исключительно численными методами. В данном случае система (13) записана в виде, удобном для применения метода Рунге-Кутты, который реализован во множестве пакетов символьной математики [7, 8].

Вместе с тем два последних уравнения системы (13) не содержат переменные x и y и могут быть решены методом разделения переменных. Запишем эти уравнения:

$$\begin{cases} \dot{z}_2 = g - A_2 z_2^2; \\ \dot{z}_1 = z_2. \end{cases} \quad (14)$$

Первое уравнение системы (14) является уравнением Риккати. Для его интегрирования проведем разделение переменных:

$$\frac{dz_2}{dt} = g - A_2 z_2^2 \qquad \dot{z} = \frac{1}{a} \frac{1 + e^{bt}}{C e^{bt} - 1}. \quad (17)$$

или

$$\frac{dz_2}{g - A_2 z_2^2} = dt;$$

$$\frac{1}{g} \sqrt{\frac{g}{A_2}} \frac{d\left(\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2\right)}{1 - \left(\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2\right)^2} = dt.$$

Проинтегрируем последнее уравнение и получим

$$\frac{1}{2\sqrt{g A_2}} \ln \left| \frac{\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2 + 1}{\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2 - 1} \right| = t + \ln C_1. \quad (15)$$

Выполним дальнейшие преобразования уравнения (13):

$$\left| \frac{\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2 + 1}{\sqrt{\frac{A_2}{g}} z_2 - 1} \right| = C e^{2t\sqrt{g A_2}}. \quad (16)$$

Обозначим $a = \sqrt{\frac{A_2}{g}}$ и $b = 2\sqrt{g A_2}$.

Тогда

$$\frac{a z_2 + 1}{a z_2 - 1} = C e^{bt},$$

а

$$a z_2 + 1 = a z_2 C e^{at} - C e^{at}$$

или

$$z_2(a - a C e^{bt}) = -(1 + C e^{bt}).$$

Определим z_2 из последнего выражения:

$$z_2 = \frac{1}{a} \frac{1 + e^{bt}}{C e^{bt} - 1}.$$

Поскольку $\dot{z} = z_2$, то получим дифференциальное уравнение первого порядка

Проинтегрируем уравнение (17):

$$z = \frac{1}{a} \int dt + \frac{2}{aC} \int \frac{dt}{e^{bt} - \frac{1}{C}}. \quad (18)$$

Обозначим $u = e^{bt} - 1/C$. Тогда $e^{bt} = u + 1/C$, а $bt = \ln|u + 1/C|$ или $t = \ln|u + 1/C|$.

$$\text{Соответственно } dt = \frac{1}{b\left(u + \frac{1}{C}\right)} du.$$

Подставим данное значение dt в уравнение (18):

$$z = \frac{1}{a} t + \frac{2}{aC} \int \frac{du}{bu(u + 1/C)} =$$

$$= \frac{t}{a} + \frac{2}{ab} \ln \frac{u}{u + 1/C} + C_2. \quad (19)$$

Вернемся к первоначальным переменным, подставив вместо u его значение:

$$z = \frac{2}{ab} \ln \left| e^{bt} - \frac{1}{C} \right| - \frac{t}{a} + C_2. \quad (20)$$

Вместо a и b подставим их значения. В результате получим

$$z = \frac{1}{A_2} \ln \left| e^{2\sqrt{A_2 g} t} - \frac{1}{C} \right| - \frac{t}{\sqrt{A_2/g}} + C_2. \quad (21)$$

Окончательно подставим в (21) значение A_2 из (11). В результате получим следующую зависимость:

$$z = \frac{2m}{k_c S_c \rho_{сж}} \ln \left| e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t} - \frac{1}{C} \right| -$$

$$- \frac{t}{\sqrt{k_c S_c \rho_{сж} / 2mg}} + C_2. \quad (22)$$

Найдем постоянные интегрирования C и C_2 . Для нахождения постоянной C продифференцируем уравнение (22). В

результате получим

$$\dot{z} = \frac{1}{A_2} \frac{1}{e^{2\sqrt{A_2 g} t} - 1/C} \times e^{2\sqrt{A_2 g} t} 2\sqrt{A_2 g} - \frac{1}{\sqrt{A_2/g}}. \quad (23)$$

Начальным моментом времени ($t = 0$) считаем момент вхождения частицы воды в винтовой канал влагоотделителя. При этом $z = 0$, следовательно допускаем, что $\dot{z} = 0$. Тогда уравнение (23) примет вид:

$$\frac{1}{\sqrt{A_2/g}} = \frac{1}{A_2} \frac{2\sqrt{A_2 g}}{1-1/C}.$$

Умножим обе части последнего уравнения на $\sqrt{A_2}$. В результате получим $C = -1$.

Постоянную интегрирования C_2 определим из уравнения (22) при упомянутых выше начальных условиях:

$$C_2 = -\frac{2m \ln 2}{k_c S_c \rho_{сж}} = \frac{1,386 m}{k_c S_c \rho_{сж}}. \quad (24)$$

Окончательно, с учетом зависимости (24) и $C = -1$, уравнение (22) примет вид:

$$z = \frac{2m}{k_c S_c \rho_{сж}} \ln \left| e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t} + 1 \right| - \frac{t}{\sqrt{k_c S_c \rho_{сж} / 2m g}} - \frac{1,386 m}{k_c S_c \rho_{сж}}. \quad (25)$$

Подставим в (23) значения A_2 из (11) и C_2 из (24). В результате получим

$$\dot{z} = \frac{2m e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t} \sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m}}{k_c S_c \rho_{сж} (e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t} + 1)} - \frac{1}{\sqrt{k_c S_c \rho_{сж} / 2m g}}. \quad (26)$$

Упростим уравнение (26). Тогда

$$\dot{z} = \sqrt{\frac{2m g}{k_c S_c \rho_{сж}}} \left(\frac{2 e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t}}{e^{\sqrt{2k_c S_c \rho_{сж} g/m} t} + 1} - 1 \right). \quad (27)$$

Как отмечалось выше, при движении потока влажного воздуха в винтовом канале влагоотделителя можно выделить два этапа:

- 1) движение по винтовому каналу до облучения;
- 2) движение после облучения.

На первом этапе происходит удаление макрочастиц воды из потока воздуха под действием центробежной силы инерции, на втором этапе – удаление микрочастиц (полимеров) воды под действием центробежной силы и силы Лоренца.

Рассмотрим *первый этап*. При движении частицы воды вместе с потоком воздуха в винтовом канале влагоотделителя до облучения сила Лоренца равна нулю, т. к. частица является электрически нейтральной. В этом случае система дифференциальных уравнений (9) примет вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega_e^2 x - (0,5 k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{x}^2; \\ \ddot{y} = -2\omega_e \dot{x} - (0,5 k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{y}^2; \\ \ddot{z} = g - (0,5 k_c S_c \rho_{сж} / m) \dot{z}^2. \end{cases} \quad (28)$$

Два первых уравнения системы (28) могут быть решены численными методами, решение третьего уравнения соответствует зависимости (25).

В конце первого этапа движения происходит облучение потока воздуха ультрафиолетовым излучением. К этому моменту макрочастицы воды должны достичь вертикальной стенки корпуса влагоотделителя, а в потоке воздуха остаться только микрочастицы воды. После облучения частицы воды приобретут положительный заряд и при вхождении в магнитное поле на них начнет действовать сила Лоренца.

На *втором этапе* движения потока влажного воздуха размеры частиц воды сопоставимы с размерами молекул возду-

ха, поэтому использовать уравнение (8) для расчета силы сопротивления F_c не представляется возможным. Проанализируем силу F_c с точки зрения основ молекулярно-кинетической теории газов. При разработке молекулярно-кинетической теории газов принято допущение, что при хаотическом движении молекул воздуха число взаимных столкновений между молекулами пренебрежительно мало по сравнению с числом ударов о стенки сосуда (в данном случае о стенки влагоотделителя). Хаотическое движение молекул заменено движением вдоль декартовых осей координат, причем в любой момент времени вдоль каждой из осей движется 1/3 часть всех молекул таким образом, что одна половина (1/6 часть) этих молекул движется в одну сторону, а вторая половина – в противоположную [9, с. 68–70; 10, с. 19–22]. Тогда, например, при движении частицы воды вдоль оси X число лобовых столкновений с молекулами воздуха и число попутных столкновений будет одинаково и, соответственно, количество движения частицы воды будет неизменным. Такие же выводы можно сделать при рассмотрении движения частицы воды вдоль осей Y и Z. При таких допущениях силой сопротивления можно пренебречь.

Тогда дифференциальные уравнения движения частицы воды после облучения будут следующими:

$$\begin{cases} \ddot{x} = (\omega_e^2 + q\omega_e B/m)x; \\ \ddot{y} = -2\omega_e \dot{x}; \\ \ddot{z} = g. \end{cases} \quad (29)$$

Как отмечалось в [1], сила Лоренца как минимум в 200 раз больше центробежной силы. При таких условиях центробежной силой можно пренебречь. Тогда дифференциальные уравнения (29) будут иметь вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m}q\omega_e Bx; \\ \ddot{y} = -2\omega_e \dot{x}; \\ \ddot{z} = g. \end{cases} \quad (30)$$

Первое уравнение системы (30) не содержит переменные z и y , является дифференциальным уравнением второго порядка и может быть решено методом характеристического уравнения. Обозначим

$$A_3 = q B / m. \quad (31)$$

Тогда

$$\ddot{x} - A_3 \omega_e x = 0. \quad (32)$$

Составим характеристическое уравнение

$$p^2 - A_3 \omega_e = 0,$$

где p – переменная характеристического уравнения; $p = \pm\sqrt{A_3\omega_e}$.

Для действительных корней характеристического уравнения получим

$$x = C_3 e^{\sqrt{A_3\omega_e}t} + C_4 e^{-\sqrt{A_3\omega_e}t}. \quad (33)$$

Определим постоянные интегрирования из начальных условий: при $t_0 = 0$, $x_0 = r_0$ (r_0 – внутренний радиус винтовой канавки влагоотделителя (см. рис. 1)). Подставив данные значения в (33), получим

$$x_0 = C_3 + C_4. \quad (34)$$

Продифференцируем уравнение (33):

$$\begin{aligned} \dot{x} = & C_3 e^{\sqrt{A_3\omega_e}t} \sqrt{A_3\omega_e} - \\ & - C_4 e^{-\sqrt{A_3\omega_e}t} \sqrt{A_3\omega_e}. \end{aligned} \quad (35)$$

При $t_0 = 0$ $\dot{x}_0 = 0$. Подставим эти значения в (33) и получим

$$C_3 - C_4 = 0. \quad (36)$$

Решим совместно (34) и (36). В результате получим

$$C_3 = C_4 = x_0 / 2 = r_0 / 2. \quad (37)$$

С учетом (31) и (37) уравнения (33) и (35) примут вид:

$$x = 0,5r_0 \left(e^{\sqrt{qB\omega_e/m} t} + e^{-\sqrt{qB\omega_e/m} t} \right); \quad (38)$$

$$\dot{x} = 0,5r_0 \left(e^{\sqrt{qB\omega_e/m} t} - e^{-\sqrt{qB\omega_e/m} t} \right) \times \sqrt{qB\omega_e/m}. \quad (39)$$

Для определения количества оборотов винтового канала целесообразно иметь зависимость $t = f(x)$, поскольку, зная время движения частицы воды до вертикальной стенки влагоотделителя, можно рассчитать длину пути движения потока воздуха в винтовом канале. Для этого решим уравнение (38) относительно t .

Обозначим $\alpha = e^{\sqrt{qB\omega_e/m} t}$. Тогда уравнение (38) примет вид:

$$x = \frac{r_0(\alpha^2 + 1)}{2\alpha} \quad \text{или} \quad r_0\alpha^2 - 2x\alpha + 1 = 0.$$

Решение данного квадратного уравнения известно:

$$\alpha_{1,2} = \frac{x \pm \sqrt{x^2 - r_0^2}}{r_0}.$$

Подставим значение α в последнее уравнение и определим t :

$$t = \frac{1}{\sqrt{qB\omega_e/m}} \ln \frac{x \pm \sqrt{x^2 - r_0^2}}{r_0}.$$

Выражение $\ln \frac{x - \sqrt{x^2 - r_0^2}}{r_0}$ при

$x \geq r_0$ будет величиной отрицательной, тогда $t < 0$, что невозможно. Поэтому уравнение для расчета времени движения частицы воды вдоль оси X будет иметь вид:

$$t = \frac{\sqrt{m}}{\sqrt{qB\omega_e}} \ln \frac{x + \sqrt{x^2 - r_0^2}}{r_0}. \quad (40)$$

Разработанная математическая модель позволяет сформулировать следующую методику выбора основных параметров влагоотделителя. Вначале, исходя из конструкции пневмопривода с учетом габаритных и присоединительных размеров, выбираем размеры r_0 и r_k (см. рис. 1). Затем выбираем площадь живого сечения винтового канала S_k и угол наклона винтового канала γ к линии, перпендикулярной оси влагоотделителя. На первом этапе можно допустить, что бы S_k была примерно равна площади живого сечения трубопровода, соединяющего компрессор с влагоотделителем. Экспериментально установлено, что $\gamma = 6...8^\circ$. При этом вертикальный габаритный размер влагоотделителя существенно не увеличивается, обеспечивается поступательное движение потока воздуха вниз со скоростью V_n и сила Лоренца F_l остается достаточно большой, поскольку угол между вектором F_l и вектором окружной скорости V_o частицы воды меньше прямого угла всего на $6...8^\circ$ [1]. После этого определяем среднюю скорость движения воздуха V_{cp} в винтовом канале и угловую скорость ω_e :

$$V_{cp} = Q/S_k, \quad (41)$$

где Q – подача компрессора или расход воздуха в пневмолинии, m^3/c ;

$$\omega_e = 2V_{cp} \sin \gamma / (r_0 + r_k). \quad (42)$$

Затем решаем два первых уравнения системы (26) численными методами при условии, что $r_k \geq x \geq r_0$, а $y \geq 0$, и находим время t_1 движения макрочастицы воды различной массы от вертикальной стенки винтового канала 4 до вертикальной стенки корпуса 2 влагоотделителя (см. рис. 1). При этом форму макрочастицы воды считаем сферической, а ее массу определяем по формуле

$$m = \rho_6 \frac{4}{3} \pi R_4^3, \quad (43)$$

где ρ_6 – плотность воды, кг/м³; R_4 – радиус макрочастицы воды, м.

Поскольку форму макрочастицы воды считаем сферической, то площадь проекции макрочастицы воды S_c на плоскость, перпендикулярную вектору V_r , определим как площадь круга:

$$S_c = \pi R_4^2. \quad (44)$$

Для принятой формы макрочастицы воды коэффициент лобового сопротивления k_c можно принять исходя из [5, с. 257–260]: $k_c = 0,62$. Для определения плотности сжатого воздуха $\rho_{сж}$ целесообразно использовать известное уравнение Клапейрона

$$\rho_{сж} = p_{a\ сж} / (R_g T_{сж}), \quad (45)$$

где $p_{a\ сж}$ – абсолютное давление сжатого воздуха, Па; R_g – газовая постоянная воздуха, $R_g = 287$ Дж/(кг·К) [11, с. 21]; $T_{сж}$ – абсолютная температура сжатого воздуха, К.

Для дальнейших расчетов выбираем максимальное значение t_1 . Затем определяем угол φ_1 , на который повернется подвижная система координат OXYZ, условно скрепленная с воздушным потоком:

$$\varphi_1 = \omega_e t_1. \quad (46)$$

Количество витков винтового канала влагоотделителя n_1 до облучения воздушного потока определяем следующим образом:

$$n_1 = \varphi_1 / 2\pi. \quad (47)$$

Высоту винтового канала определяем с помощью зависимости (25), подставив в нее полученное значение t_1 .

На втором этапе после облучения воздушного потока происходит удаление микрочастиц воды, которые в результате облучения получают положительный за-

ряд. При этом с помощью уравнения (40) при условии, что $r_k \geq x \geq r_0$, а $y \geq 0$, находим время t_2 движения микрочастицы воды различной массы от вертикальной стенки винтового канала 4 до вертикальной стенки корпуса 2 влагоотделителя (см. рис. 1). Расчеты выполняем для наихудших условий, считая, что микрочастица воды получила минимальный положительный заряд, т. е. в результате облучения выбит один электрон – $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл [12, с. 10]. Индукцию магнитного поля B определяем с помощью методики, изложенной в [1]. Массу микрочастицы определяем исходя из того, что масса молекулы воды составляет $2,993 \cdot 10^{-26}$ кг [12, с. 10], а микрочастица воды может содержать до миллиона молекул. В качестве дальнейшего расчетного выбираем наибольшее значение t_2 . Затем с помощью зависимостей (46) и (47) определяем количество витков винтового канала влагоотделителя n_2 после облучения воздушного потока.

Заключение

Таким образом, разработанная математическая модель центробежно-магнитного влагоотделителя позволяет выбрать его основные параметры: размеры винтового канала и количество витков канала до и после облучения потока сжатого воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галюжин, А. С. Осушка сжатого воздуха с помощью магнитного поля / А. С. Галюжин // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 126–134.
2. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики : учеб. пособие в 2 т. / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – СПб. : Лань, 1998. – Т. 1. – 736 с.
3. Никитин, Н. Н. Курс теоретической механики : учебник для студентов вузов / Н. Н. Никитин. – М. : Высш. шк., 1990. – 607 с.

4. **Арцимович, Л. А.** Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях / Л. А. Арцимович, С. Ю. Лукьянов. – М. : Наука, 1978. – 224 с.

5. **Альтшуль, А. Д.** Гидравлика и аэродинамика : учебник для студентов вузов / А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов. – М. : Стройиздат, 1987. – 414 с.

6. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы : учебник для машиностроительных вузов Т. Башта [и др.]. – 2-е изд. перераб. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.

7. **Кириянов, Д. В.** Самоучитель MATHCAD / Д. В. Кириянов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.

8. **Охорзин, В. А.** Прикладная математика

в системе MATHCAD : учеб. пособие / В. А. Охорзин. – 3-е изд. – СПб. : Лань, 2009. – 352 с.

9. **Трофимова, Т. Н.** Курс физики : учебник для студентов вузов / Т. Н. Трофимова. – М. : Высш. шк., 1985. – 432 с.

10. **Кикоин, А. К.** Молекулярная физика : учеб. пособие / А. К. Кикоин, И. К. Кикоин. – М. : Наука, 1976. – 480 с.

11. Справочное пособие по гидравлике, гидромашин и гидроприводам / Я. М. Вильнер [и др.] ; под общ. ред. Б. Б. Некрасова. – Минск : Выш. шк., 1985. – 382 с.

12. **Радциг, А. А.** Параметры атомов и атомных ионов : справочник / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 344 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 16.03.2011

A. S. Galiyzhin
Mathematical model of movement
of a particle of water in a field of
force of the centrifugal-and-magnetic
moisture separator

The mathematical model of movement of a particle of water in the screw channel of the centrifugal-and-magnetic moisture separator which makes it possible to choose its key parameters has been developed. The model considers the action of centrifugal force, Lorentz forces, gravity and Coriolis force as well as running resistance force.

УДК 621.787

Н. С. Гарлачов, канд. техн. наук, доц., Е. Н. Антонова, канд. техн. наук

ОСНАСТКА ДЛЯ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

В статье рассмотрены вопросы анализа технологического обеспечения процесса пневмоцентробежной обработки отверстий маложестких деталей. Показана необходимость в разработке специального оборудования для пневмоцентробежной обработки отверстий таких заготовок. Предложена общая компоновка установки для обработки отверстий, позволяющая проводить обработку с минимальными затратами электроэнергии. Приведены обоснования экономической эффективности предложенной установки.

Введение

Пневмоцентробежная обработка (ПЦО) позволяет обрабатывать нежесткие детали с обеспечением упрочнения поверхностного слоя с небольшими внутренними напряжениями на малой глубине, что положительно влияет на триботехнические свойства поверхностей пар трения и способствует повышению их долговечности.

Анализ технического обеспечения процесса пневмоцентробежной обработки показал, что существует большое количество конструкций пневмоцентробежных раскатников. Пневмоцентробежная обработка, как правило, производится на универсальном оборудовании (токарных, радиально-сверлильных, вертикально-фрезерных станках), мощность двигателей которых значительно превышает необходимую для осуществления процесса обработки. Специальное оборудование с мощностью, необходимой для данного процесса обработки, отсутствует.

Существует установка с гидроприводом подачи, однако она не удовлетворяет требованиям по равномерности хода, что немаловажно для получения регулярного микрорельефа. Поэтому возникает необходимость в разработке оборудования с другим видом привода, обладающим более совершенными характеристиками.

Поэтому создание малогабаритной установки, позволяющей проводить пневмоцентробежную обработку отвер-

стей заготовок малой жесткости с минимальными затратами электроэнергии, является *актуальной* задачей.

Анализ технологического обеспечения процесса пневмоцентробежной обработки

При обработке нежестких изделий возникают трудности при установке и закреплении на станке. Это связано с тем, что при приложении усилий от элементов станочного приспособления возникает деформация обрабатываемого изделия.

В [1] проводилась обработка гильз двигателей автомобилей КамАЗ из модифицированного чугуна (внутренний диаметр гильзы – 120 мм) и гильзы трактора МТЗ (внутренний диаметр гильзы – 110 мм). Обработка гильз двигателей автомобилей КамАЗ выполнялась однорядным пневмоцентробежным раскатником [2] на токарном станке модели 16К20. Гильзы устанавливались в цанговый стакан, а затем крепились в трехкулачковом патроне, причем точность центрирования гильз контролировалась с помощью индикатора часового типа.

При проектировании технологической оснастки для обработки деталей небольшой длины рекомендуется располагать продольную ось детали в вертикальной плоскости. Маложесткие детали обладают большей жесткостью в направлении продольной оси по сравнению с поперечной плоскостью [3]. Наличие по длине детали различных по

форме и конструктивным размерам дополнительных элементов (рис. 1) определяет ее переменную жесткость, которую необходимо учитывать при разработке инструментов. Применение устройств с гидропластмассовыми элемен-

тами для закрепления особо тонкостенных втулок не дало положительных результатов. Даже незначительная остаточная деформация упрочненной втулки не позволяет свободно извлечь ее из устройства.

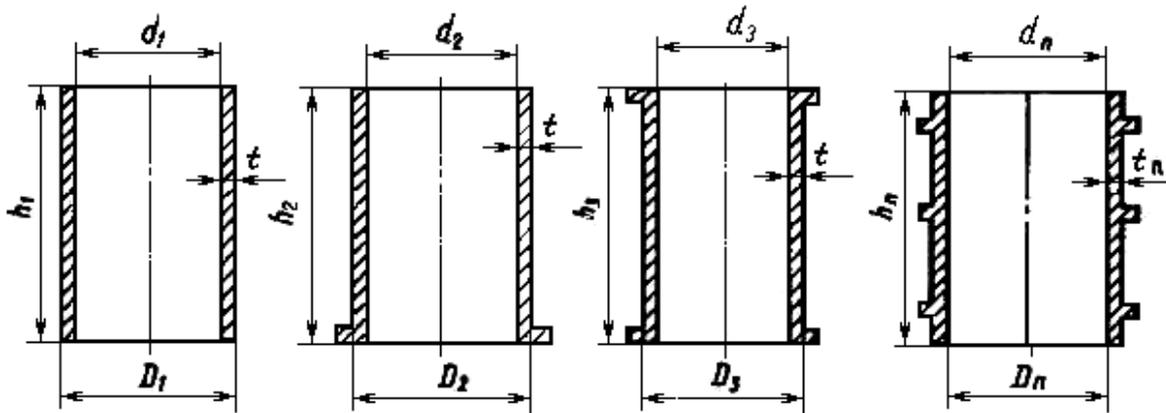


Рис. 1. Нежесткие детали с переменной радиальной жесткостью

Схема наладки и приспособление для пневмоцентробежной обработки отверстий гильзы, рекомендуемое в [3], представлены на рис. 2. Обрабатываемая деталь 1 устанавливается наружной цилиндрической поверхностью по внутренней поверхности диафрагмы, выполненной из резины.

Деталь закрепляется в результате подачи сжатого воздуха в рабочую полость 4 с расположенной в ней диафрагмой 2. Она плотно охватывает деталь по всей поверхности. Диафрагма имеет продольные пазы 3, в которые можно подавать СОЖ. В нижней части устройства расположен глушитель шума 5, а в верхней – раскатник 6. Отличие раскатника от известных конструкций состоит в том, что он снабжен уплотнителем 7, который при входе в цилиндр препятствует свободному выходу сжатого воздуха в атмосферу.

Осевое перемещение инструмента обеспечивается посредством пневмоили гидропривода, а вращение деформирующих элементов – с помощью сжатого воздуха. Уплотнитель 7 инст-

румента, входя в контакт с внутренней поверхностью цилиндра, перекрывает выход отработавшей среде, которая устремляется вниз в направлении рабочей подачи и, пройдя глушитель 5, в атмосферу. По окончании обработки инструмент занимает положение, необходимое для снятия обработанной детали и установки новой, предварительно выпускается воздух из рабочей полости диафрагмы, размещенной в корпусе 2.

Предлагаемая конструкция не удовлетворяет требованиям по равномерности хода, что немаловажно для получения регулярного микрорельефа. Специальное оборудование с мощностью, нужной для процесса обработки, отсутствует. Поэтому возникает необходимость в дальнейших исследованиях для разработки оборудования с другим видом привода, обладающим более совершенными характеристиками.

При обработке же поверхностей отверстий двухрядным пневмоцентробежным раскатником, у которого деформирующие шары во втором ряду вращаются в противоположном направлении, проис-

ходит уравнивание сил, приводящих во вращение опытный образец, т. е. он практически не вращается.

На основании экспериментальных исследований [4] установлено, что при пневмоцентробежной обработке отверстий крутящий момент, возникающий на обрабатываемом изделии, при воз-

действии на него деформирующих шаров незначителен и находится в пределах от 0,05 до 0,35 Н·м, что позволяет исключить силовое воздействие зажимных элементов станочного приспособления, упростить его конструкцию, исключить деформацию заготовки.

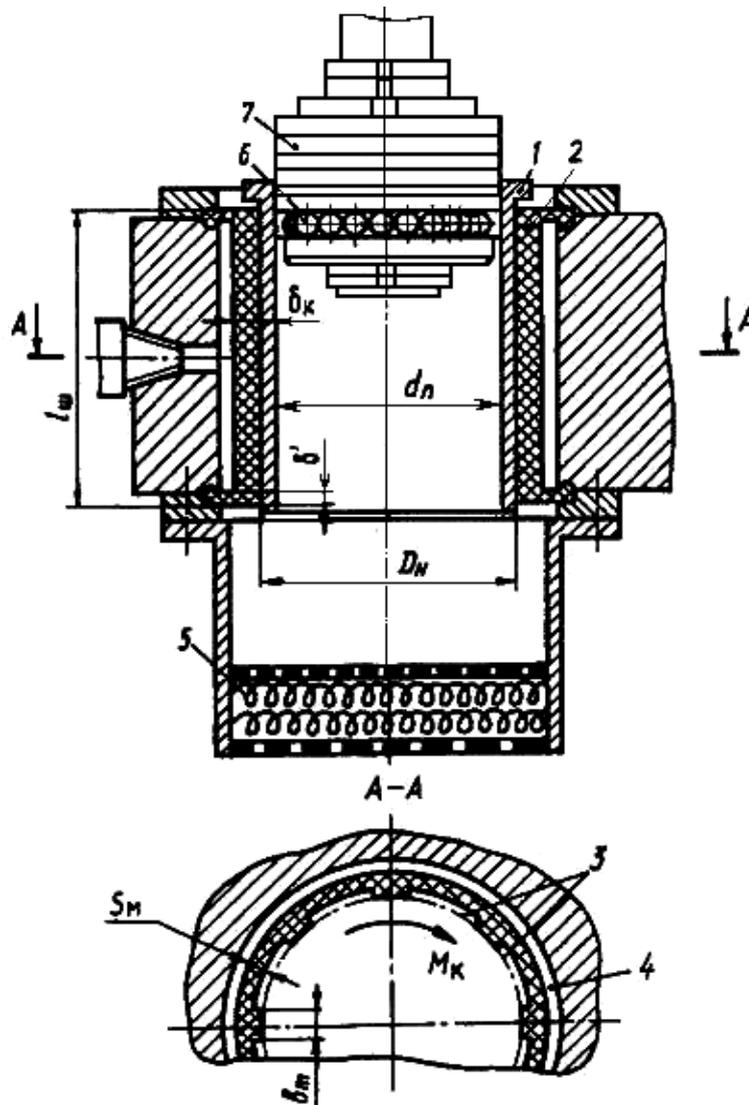


Рис. 2. Схема наладки и приспособление для пневмоцентробежной обработки зеркала гильзы

Полученные данные позволяют при проектировании оснастки свести до минимума или полностью исключить силовое воздействие зажимных элементов приспособления на обрабатываемое изделие. Этот принцип был реализован в приспособлении при эксперименталь-

ной обработке гильз цилиндров на Минском моторном заводе [1].

Приспособление, рассмотренное в [1, 5], состоит из сварного корпуса с неподвижно закрепленным на нем кольцом, шариков и сепаратора, установленных в кольце. Диск, имеющий вы-

ступы для базирования по буртику обрабатываемой гильзы, устанавливается сферической поверхностью на шарики.

Обработка гильз цилиндров трактора МТЗ выполнялась унифицированным двухрядным пневмоцентробежным раскатником [2].

Раскатник крепился к вращающейся пневмокамере, закрепленной на шпинделе радиально-сверлильного станка модели 2М552. Воздух к осевому отверстию инструмента подавался через шланг и пневмокамеру, а давление фиксировалось с помощью манометра. В инструменте можно было устанавливать шары диаметрами 8; 10; 12,7 мм. Диаметры сопел в распорных втулках – 2 и 2,5 мм соответственно в первом и втором ряду. Обработка выполнялась при избыточном давлении 0,2 МПа и при продольной подаче инструмента 95 мм/мин.

Данная конструкция приспособления, наряду с отсутствием зажимных элементов, исключающих силовое воздействие на обрабатываемую гильзу, позволяет ей самоустанавливаться соосно с осью раскатника, что повышает качество обработки.

Рассмотренная конструкция приспособления может устанавливаться на столе универсальных станков с вертикальной компоновкой, а также использоваться в простых устройствах, снабженных механизмом подачи инструмента. Погрешность центрирования оси инструмента должна составлять не более 0,1 мм [5].

Общая компоновка установки для пневмоцентробежной обработки

Разработана общая компоновка установки, позволяющая обрабатывать изделия высотой до 300 мм с подачей от 60 до 160 мм/мин (рис. 3). Все основные узлы установки: электродвигатель 1, редуктор 2, стол 3 с глушителем 4 – размещены на сварной раме 5. Установка состоит из электродвигателя постоянного тока 1, соединенного с помощью муфты 6 с редук-

тором 2. Шестерня редуктора входит в зацепление с зубчатой рейкой, закрепленной на полой шпинделе 7. При включении электродвигателя осуществляется осевое перемещение шпинделя, т. е. подача. Инструмент 8 (раскатник) устанавливается на конце полого ходового винта, через отверстие которого подается сжатый воздух, приводящий шарики в движение. На столе размещается кольцо 9, снабженное сепаратором с шариками, на которые устанавливается диск 10, являющийся базовой поверхностью для обрабатываемого изделия. В столе 3 имеется отверстие для выхода отработанного воздуха, к отверстию крепится глушитель 4.

Данная установка позволяет самоустанавливаться заготовке за счет совмещения ее оси с осью инструмента, а также исключить силовое воздействие на обрабатываемую заготовку.

Разработанная установка позволит производить пневмоцентробежную обработку отверстий (диаметром от 20 до 140 мм) различных деталей с наименьшими затратами площади, материалов и электроэнергии. Потребляемая мощность установкой – 0,55 кВт, а потребляемая мощность токарно-винторезным станком – 11 кВт, что в 20 раз больше.

Технико-экономическая эффективность применения установки для пневмоцентробежной обработки отверстий нежестких заготовок

Себестоимость установки определяется укрупненными методами на основе нормативов и типовых зависимостей.

При этом затраты на материалы рассчитываются из соотношения

$$C_m = \sum^n C_i \cdot M_i \cdot K_{тзр} \cdot K_{пр}, \quad (1)$$

где n – виды потребляемых материалов (чугун, сталь, цветные металлы, пластмассы и т. п.); M_i – норма расхода i -го мате-

риала, т; $K_{пр}$ – коэффициент прочих (неучтенных) материалов, $K_{пр} = 1,1 \dots 1,15$; Π_i – цена за единицу i -го материала, тыс. р.;

$K_{тзр}$ – коэффициент транспортно-заготовительных расходов, $K_{тзр} = 1,03$.

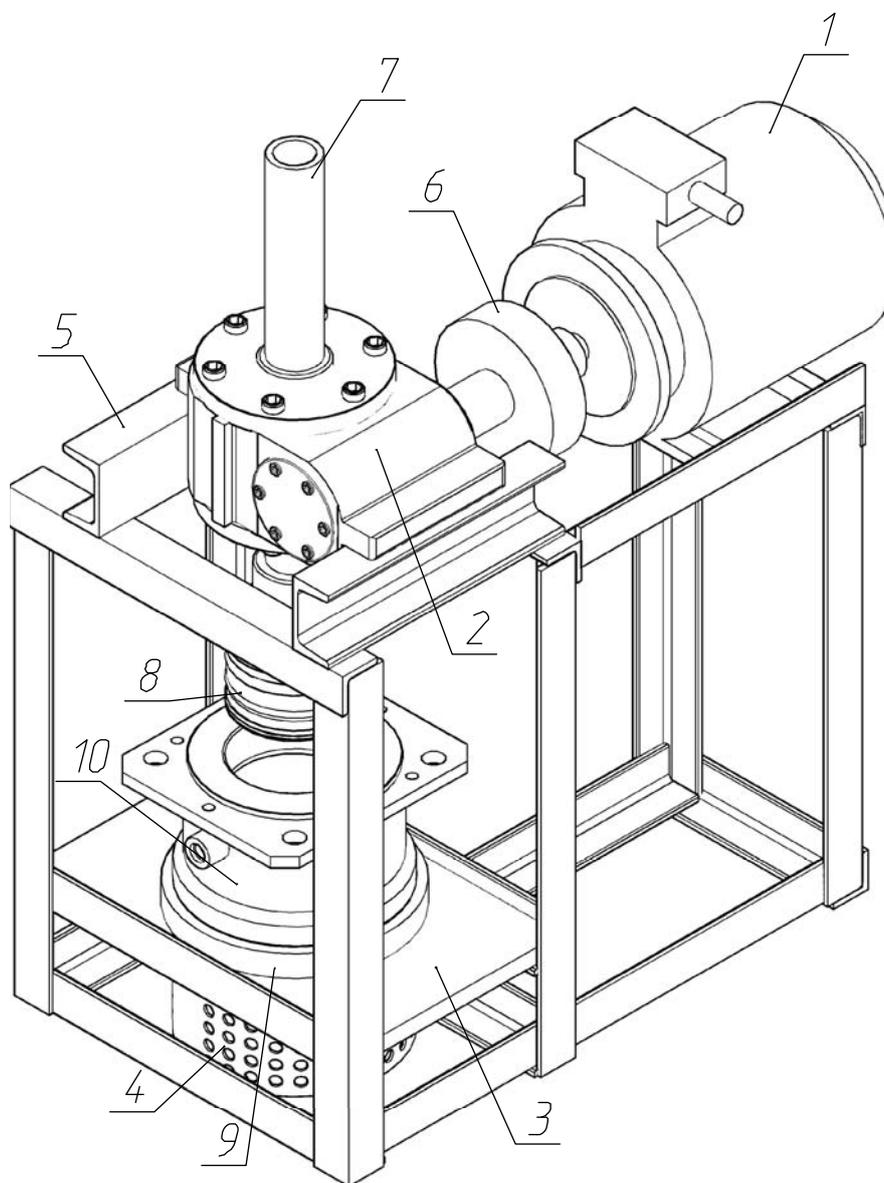


Рис. 3. Общая компоновка установки для пневмоцентробежной обработки отверстий

Нормы расхода можно определить по формуле

$$M = \frac{M_d}{K_{ис}}, \quad (2)$$

где M_d – масса детали, т; $K_{ис}$ – коэффициент использования материалов (для корпусов – 0,6...0,8; для валов – 0,7...0,9; шестерен – 0,55...0,7).

Затраты на комплектующие (покупные) изделия рассчитываются по формуле

$$C_k = \sum_{i=1}^n \Pi_i \cdot N_i \cdot K_{тзр} \cdot K_{пр}, \quad (3)$$

где n – число наименований комплектующих изделий (крепеж, подшипники, электродвигатели, микросхемы и т. п.);

C_i – цена за единицу i -го комплектующего, тыс. р.; N – количество изделий в конструкции, шт.

Результаты расчетов затрат на материалы и комплектующие изделия приведены в табл. 1.

Табл. 1. Затраты на материалы и комплектующие изделия

Вид комплектующих	Количество	Стоимость, тыс. р.	Всего, тыс. р.
Электродвигатель	1	1456	1456
Подшипник 7205	2	20	40
Подшипник 2007511	2	50	100
Муфта	1	40	40
Итого			1636

Стоимость прочих материалов и комплектующих изделий можно принять в пределах 5...15 % от расчетных значений.

$$C_k = 1636 \cdot 1,15 \cdot 1,03 = 1937,8 \text{ тыс. р.}$$

Основная зарплата рабочих на изготовление и сборку может быть найдена таким образом:

$$ЗП = C_{\text{ч}} \cdot T \cdot K_{\text{п}}, \quad (4)$$

где $C_{\text{ч}}$ – средняя часовая тарифная ставка рабочего, тыс. р.; T – общая трудоемкость изготовления деталей и сборки узла, ч; $K_{\text{п}}$ – коэффициент премий, $K_{\text{п}} = 1,4$.

Трудоемкость работ

$$T = \sum t_i \cdot M + t_{\text{сб}}, \quad (5)$$

где t_i – удельная трудоемкость на 1 т массы соответствующих деталей, ч/т; $t_{\text{сб}}$ – оценочная трудоемкость сборки, ч.

В расчетах можно принять следующие значения t :

– простые сварные конструкции – 200...250 ч/т;

– механообработка простых деталей – 300...350 ч/т;

– обработка шестерен и редукторов – 600...650 ч/т;

– изготовление автоматических гидравлических и электрических устройств – 200...250 ч/т.

$$T = 10 + 15 + 3,15 + 10 = 38,15 \text{ ч.}$$

$$ЗП = 2,26 \cdot 1,4 \cdot 38,15 = 120,87 \text{ тыс. р.}$$

Результаты расчетов по себестоимости узла представлены в табл. 2.

Табл. 2. Себестоимость узла

Наименование	Обозначение	Сумма, тыс. р.
Основные материалы	$C_{\text{м}}$	71,8
Комплектующие изделия	$C_{\text{к}}$	1937,8
Основная зарплата рабочих	ЗП	120,87
Дополнительная зарплата	ЗП _{доп}	12,09
Отчисления на социальные нужды	$O_{\text{с.н.}}$	47,86
Общепроизводственные расходы	$P_{\text{оп}}$	240
Общехозяйственные расходы	$P_{\text{ох}}$	145
Всего		2575,6

Заклучение

На основании проведенного анализа принципа работы пневмоцентробежных раскатников, технического оснащения пневмоцентробежной обработки, результатов измерений крутящего момента, возникающего на заготовке при обработке, разработана общая компоновка установки, позволяющая производить пневмоцентробежную обработку отверстий (диаметром от 20 до 140 мм, высотой до 300 мм, подачей от 60...160 мм/мин) нежестких заготовок, исключить затраты на эмульсию, уменьшить производственную площадь, сократить затраты на электроэнергию в 20 раз по сравнению с такими же затратами токарно-винторезного станка. Ориентировочная стоимость установки по ценам 2009 г. составит 2575,6 млн р.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Минаков, А. П.** Обработка изделий из чугуна пневмоцентробежным раскатником / А. П. Минаков, Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова // Сб.

науч. тр. членов Междунар. Балтийской Ассоц. машиностроителей. – Калининград, 2005. – № 5. – С. 62–64.

2. **Пат. 421 РБ, В 24 В 39 / 02.** Инструмент для обработки цилиндрических отверстий методом пластической деформации / Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова ; заявитель и патентообладатель Гарлачов Николай Семенович, Антонова Елена Николаевна. – № 20010148 ; заявл. 14.06.01; опубл. 30.12.01. – 4 с.

3. **Минаков, А. П.** Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков, А. А. Бунос ; под ред. П. И. Ящерицина. – Минск : Наука і тэхніка, 1995. – 304 с.

4. **Антонова, Е. Н.** Влияние конструктивных и технологических факторов на крутящий момент втулки при ее обработке пневмоцентробежным раскатником / Е. Н. Антонова, А. М. Кисленков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Респ. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – С. 19.

5. **Гарлачов, Н. С.** Технология пневмоцентробежной обработки отверстий / Н. С. Гарлачов, Е. Н. Антонова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 44–52.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 02.03.2011

N. S. Garlachov, E. N. Antonova
Equipment for processing holes
pneumocentrifugal

The paper deals with analysis of the technical support process pneumocentrifugal processing holes malozhestkih details. The design of the installation to allow a pneumocentrifugal processing holes of workpieces with minimal electricity. Will summarize the rationale of economic efficiency of the proposed design.

УДК 378.14(07)

Н. Н. Гобралев, канд. техн. наук, доц., Е. В. Ильюшина, канд. техн. наук

ИНЖЕНЕРНАЯ ГРАФИКА: ФОРМА ИЗЛОЖЕНИЯ И СОДЕРЖАНИЕ КОНСПЕКТА

Проанализированы особенности восприятия материала графических дисциплин студентами-первокурсниками. Предложены способы повышения эффективности его усвоения на лекциях и практических занятиях.

Наиболее распространенной формой получения знаний в вузе является лекция, на которой преподаватель излагает учебный материал, закрепляемый в дальнейшем студентами на практических и лабораторных занятиях. Такая структура обучения имеет огромное преимущество. Оно заключается в том, что лектор, при соответствующих условиях, способен за относительно короткое время передать значительному числу слушателей достаточно полные сведения по рассматриваемым вопросам.

Но вследствие большого объема излагаемого материала лекция чаще всего носит характер монолога. В связи с этим возникают и недостатки. Они, с одной стороны, объясняются причинами субъективного характера, когда лектор из-за своего эмоционального состояния, различий в мысленной и звуковой речи не всегда может в запланированной форме выдать учебный материал. С другой стороны, студенты по тем же причинам воспринимают его слова по-разному. Одни не слушают вообще, другие слушают и просто слышат, третьи слушают и понимают и лишь четвертые слушают и усваивают.

В случае преподавания начертательной геометрии положение еще больше усугубляется. В последние годы в школьном курсе предмет «Черчение» отсутствовал, поэтому у учащихся к моменту поступления в вуз понятийный аппарат по дисциплине не сформировался. Кроме того, вузовская программа подготовки инженеров предусматривает

изучение в первом семестре начертательной геометрии, однако к этому моменту времени студенты пока еще не привыкли к манере обучения в высшей школе и не имеют навыков ведения конспектов. Специфика же названной дисциплины заключается в выполнении большого объема графических построений, которые вначале на доске проводит преподаватель, а затем повторяют в своих конспектах студенты. Причем нередко случаи, когда незначительное изменение исходного чертежа ведет к не наглядному решению задачи, а значит, к непониманию. Такие негативные аспекты приводят к тому, что материал лекции усваивается не полностью и не всеми студентами одинаково. Особенно это заметно на примере установочных сессий для студентов-заочников, отличительной чертой занятий с которыми является предельно сжатая программа, согласно которой они учатся по 12...14 ч в день, а количество практических занятий по детальному разбору и закреплению учебного материала сведено к минимуму.

Это отмечалось преподавателями графики машиностроительного профиля Белорусского национального технического университета [1]. Проверка студенческих конспектов показывает, что графические иллюстрации выполняются плохо и с ошибками, а текстовый материал записывается сокращенно или часто вообще отсутствует. По учебникам же изучить предмет довольно непросто, т. к. материал перегружен поясняющи-

ми графическими иллюстрациями и описаниями. Для их осмысления требуется определенная подготовка.

Данный вывод подтвердился также рядом социологических исследований, проведенных на кафедре Белорусско-Российского университета. Студенты после 3...5 лекционных занятий опрашивались по вопросам: понятен ли читаемый материал; повторяется ли он перед следующей лекцией; устраивает ли скорость его изложения; есть ли трудности с начертательной геометрией и в чем они заключаются; какова сравнительная оценка лекций по начертательной геометрии с лекциями по дру-

гим дисциплинам. Причем для выявления уровня восприятия материала вывдился коэффициент, учитывающий значимость этих вопросов, а также долю положительных ответов на них. Он определялся по формуле

$$K_{\text{вм}} = V_1 \cdot K_{\text{ср1}} + V_2 \cdot K_{\text{ср2}} + V_3 \cdot K_{\text{ср3}},$$

где $K_{\text{вм}}$ – коэффициент восприятия материала по дисциплине; V_1, V_2, V_3 – значимость вопроса; $V_1 = 0,5; V_2 = 0,3; V_3 = 0,2$; $K_{\text{ср}i}$ – среднее значение положительных ответов на i -й вопрос.

Данные об уровне восприятия материала по годам приведены в табл. 1.

Табл. 1. Восприятие лекционного материала по начертательной геометрии студентами различных специальностей по годам

Учебный год, специальность потока (количество студентов)	$K_{\text{вм}}$	Оценка лекций по 5-балльной шкале
1997/98; специальность ТМ (30 чел.)	0,69	4,5
1998/99; специальность АСОИ (60 чел.)	0,65	4,2
1999/2000; специальность ТМ (74 чел.)	0,68	4,2
2001/02; специальность СП (46 чел.)	0,73	4,4
2002/03; специальность ТМ (54 чел.)	0,73	4,1
2004/05; специальность ТМТ + СП + СПТ (77 чел.)	0,73	4,1
2004/05; специальность ТМ + ТОМП (86 чел.)	0,64	4,1
2005/2006; специальность ТМ + ТМТ (65 чел.)	0,72	4,1
2005/06; специальность СП + СПТ (64 чел.)	0,6	4,3
2006/07; специальность ТМ + АПМ (78 чел.)	0,55	4,1
2009/10; специальность ТМ + АПМ (78 чел.) в начале семестра	0,58	4,2
2009/10; специальность ТМ+АПМ (67 чел.) в конце семестра	0,69	4,5

Анализ и систематизация полученных ответов показали, что в требуемом объеме усваивают материал лекции лишь 20...25 % студентов, около 50 % его понимают, но не всегда успевают законспектировать необходимое, а порядка 25 % имеют значительные трудности с данной дисциплиной.

Как же повысить эффективность изложения материала по начертательной геометрии?

Очевидно, что учебный процесс должен оставаться организованным в виде лекций и практических занятий. В условиях массового образования такая форма обучения является более предпочтительной. Объем графического материала тоже нельзя уменьшать, т. к. чертежи – это элементы образного мышления, которое значительно быстрее словесного и описательного. Нужно, по-видимому, изменить способ пред-

ставления лектором иллюстраций и передачи изображенной информации студенту, чтобы исключить потери времени на ее перерисовывание и записывание под диктовку.

Кроме того, изложение материала лекции должно быть таким, чтобы у слушателей была возможность для самостоятельного творческого мышления. Лучше всего, когда в конспекте будут зарезервированы свободные места, на которых студенты, систематизируя и анализируя предыдущий материал, смогут делать какие-то пометки – записывать кратко ход решения задачи, отмечать опорные моменты, делать выводы.

В наибольшей степени отмеченные пожелания сможет учитывать организация лекций по начертательной геометрии с использованием подготовленных конспектов-клише, которые будут заранее приобретаться студентами. В них в требуемой последовательности будут представлены все необходимые теоретические выкладки, приведены формулировки основных определений и аксиом, а также изображены чертежи с условиями задач. При изложении лектором материала студентам достаточно лишь следить за ним по конспектам, вникать в суть разъяснений и только дублировать проводимые построения. А чтобы направить их действия на повторение, анализ и систематизацию материала, нужно предлагать им самостоятельно записывать в краткой символической форме алгоритм предыдущего решения. По окончании лекции или при домашней ее проработке студенты в конспекте должны будут письменно ответить на вопросы по общему анализу учебного материала с целью выявления в нем полезности, наиболее запомнившихся моментов и формирования предложений по улучшению изложения. Это будет способствовать развитию у них творческого мышления. После экзамена эти конспекты целесообразно собрать, а содержащуюся в них информацию проанализировать для внесения последую-

щих корректив.

Такие конспекты-клише уже применялись в учебном процессе кафедры «Начертательная геометрия и черчение» Белорусско-Российского университета на занятиях со студентами-заочниками. Заполнение их записями было более насыщенным, чем конспектов в виде простых тетрадей, а студенты, которые вели конспекты-клише, успешно сдавали экзамен.

Наибольшую эффективность от лекций по начертательной геометрии можно получить, применяя современные компьютерные технологии, а именно мультимедийные средства. Они позволяют максимально сжимать учебный материал, строить лекцию в том же ключе, что и с использованием обычного мела и доски, а также являются очень привлекательными для студентов [2]. По данным опроса, проведенного в Брестском государственном техническом университете среди 175 студентов, 90 % предпочли бы слушать лекцию, где графический материал излагался с помощью проектора, т. к. 65 % опрошенных имели трудности с ведением конспекта и с пониманием материала.

Но анализ мультимедийных технологий показывает, что изложение учебного материала с их помощью также имеет недостатки. Об этом говорилось на научно-методическом семинаре в Белорусско-Российском университете 27.01.2010 г.

Во-первых, большинство студентов воспринимают лекцию как фильм – пришел и всего лишь посмотрел. Никакая работа по осмыслению и усвоению материала не проводится, о чем свидетельствовали результаты последующих экзаменов.

Во-вторых, один раз создав лекцию, преподаватель в будущем не уделяет достаточного времени на подготовку к ней. Это расслабляет и снижает профессионализм лектора. подача учебного материала эффективна в том случае, когда он воспринимается не

только как учебно-информационный текст, но и как спрессованный опыт лектора, куда включен его личный научный потенциал, исследования, анализ проблемы. Подобный подход чрезвычайно оживляет студенческую аудиторию, вызывает обсуждение проблемных вопросов, и материал хорошо усваивается [3]. Об этом говорил также министр образования Республики Беларусь А. М. Радьков на вручении сертификата качества Белорусско-Российскому университету. Он отмечал, что никакие технические средства обучения, например радио, магнитофоны, телевизоры, компьютеры, не могут отменить участие в процессе обучения преподавателя. Только он может подробно, основательно и доходчиво разъяснять материал.

Поэтому мультимедиалекция, на взгляд кафедры начертательной геометрии и черчения Белорусско-Российского университета, все же должна проходить с ведением конспекта. И лучшей его формой является конспект-клише.

Есть свои особенности и при проведении практических занятий по инженерной графике. Применять здесь мультимедийные средства экономически нецелесообразно, т. к. численность студентов в подгруппах составляет 10...15 человек, и преподаватель в этом случае может почти с каждым из них провести индивидуальную разъяснительную работу. Кроме того, при изучении раздела дисциплины «Начертательная геометрия» студенты уже работают по заранее приобретенным тетрадам-клише, в которых имеются отдельные базовые положения теории и приведены условия задач. Но опять-таки, не все должным образом участвуют в процессе решения – кто-то просто копирует с доски действия преподавателя. Поэтому с целью более активного вовлечения их в учебный процесс применяется следующая методика.

Во-первых, студентам предлагается работать бригадами по 2...3 человека. Во-вторых, приступая к решению

задачи, преподаватель вначале проводит ее разбор с применением абстрактных пространственных моделей, где формирует конечную цель и определяет пути ее достижения. В-третьих, чтобы не проверять ход решения у каждой бригады, преподаватель устанавливает контрольные метрические характеристики на конечных чертежах задачи. Сопоставление этих характеристик позволяет самим студентам определять правильность своих решений.

Следует отметить, что при таком подходе преподаватель очень редко выполняет графические построения на доске.

При проведении практических занятий по другим разделам инженерной графики (геометрическое и проекционное черчение, машиностроительное и строительное черчение) успех усвоения учебного материала в значительной степени зависит от способности моделирования студентами рассматриваемой ситуации. То есть насколько у них будет развито пространственное мышление, настолько полно можно будет представлять и исследовать изучаемый объект. Способствует этому применение в учебном процессе примеров-образцов, чаще всего они имеют вид схемы или чертежа. При этом следует учитывать и большое число условностей, связанных с выполнением чертежей машиностроительного, строительного и электротехнического профиля, что оговаривается в перечне соответствующих стандартов. Кроме того, т. к. чертежи отражают реальные объекты производства, то излишним бывает постоянное приведение примеров практического их применения.

Блоки учебного материала, касающиеся чертежей таких особых групп, помещаются в методических указаниях. Они содержат и краткие характеристики изделий, и требования стандартов по их выполнению, и примеры выполнения. Но чтобы студенты смогли самостоятельно работать с методичками, на практических занятиях при рас-

смотрении соответствующего учебного материала преподаватель дает его разъяснение, используя по возможности различные иллюстративный материал.

Иллюстративный материал условно можно разделить на следующие группы:

1) материал в виде *образного представления* объекта, которое преподаватель формирует у студентов описательно, словесно. Невысокая эффективность от использования этой группы иллюстраций определяется тем, что не все студенты имеют достаточный кругозор и способны представить объект в «мыслях»;

2) *реальные модели* изучаемых объектов и им сопутствующие чертежи, которые можно представлять даже на доске. Недостатком этой группы является ограниченность на кафедре количества реальных учебных моделей;

3) *плакаты*, которые содержат и наглядные рисунки-иллюстрации, и изображения объектов в виде чертежей. Недостатком является также их ограниченность и то, что при изучении последовательности некоторых действий бывает затруднительно показать динамику явлений;

4) *компьютерные*, главным образом, мультимедийные технические средства обучения в виде презентаций и слайдов. Они позволяют представлять большие объемы иллюстративного материала, в том числе и в динамике.

В заключение можно сделать сле-

дующие выводы.

1. При изучении дисциплины «Инженерная графика» лекции целесообразно проводить с использованием мультимедийных средств и конспектов-клише.

2. Практические занятия по начертательной геометрии – с использованием тетрадей-клише и организацией бригад студентов.

3. Практические занятия по геометрическому, проекционному, машиностроительному и строительному черчению – с использованием компьютерных презентаций и слайдов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зеленый, П. В.** Структуризация курса и типовая алгоритмизация как средство оптимизации усвоения начертательной геометрии / П. В. Зеленый, Е. И. Белякова // Образовательные технологии в преподавании графических дисциплин : материалы II Респ. науч.-практ. конф., Брест, 18–19 мая 2007 г. – Брест : БрГТУ, 2007. – С. 33–35.

2. **Ярошевич, О. В.** Мультимедийные технологии как средство повышения качества графической подготовки / О. В. Ярошевич // Образовательные технологии в преподавании графических дисциплин : материалы II Респ. науч.-практ. конф. Брест, 18–19 мая 2007 г. – Брест : БрГТУ, 2007. – С. 93–94.

3. **Кондрашчик, Н. И.** Обучающие технологии графических дисциплин / Н. И. Кондрашчик, С. А. Матюх // Образовательные технологии в преподавании графических дисциплин : материалы III Респ. науч.-практ. конф. Брест, 21–22 мая 2009 г. – Брест : БрГТУ, 2009. – С. 52–54.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 22.02.2011

N. N. Gobraiyov, E. V. Ilyushina
Engineering graphics: the way
of presentation and compendium
content

The peculiarities of the perception of graphic disciplines material by first-year students have been analyzed. Means to increase learning efficiency at lectures and practical classes have been suggested.

УДК 621.791.763.1

С. Н. Емельянов, канд. техн. наук, В. А. Попковский, канд. техн. наук, доц.,
А. А. Катькало, канд. техн. наук, доц., А. О. Коротеев

О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ПРИ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ ОЦИНКОВАННЫХ СТАЛЕЙ С СОХРАНЕНИЕМ ПОКРЫТИЯ

Определены условия сохранения защитного цинкового покрытия в местах контактирования электродов с деталью при контактной точечной сварке оцинкованных сталей. Исследован характер изменения сопротивления и падения напряжения в контакте электрода с деталью при использовании электродов с различной формой рабочей поверхности и предложены эмпирические формулы для выбора параметров режима сварки.

Введение

К сварным соединениям, выполненным на сталях с защитными цинкосодержащими покрытиями, предъявляются высокие требования по прочности и коррозионной стойкости в условиях динамических нагрузок и действия агрессивной среды. В большинстве случаев значения параметров режима сварки выбирают, ориентируясь на параметры сварки аналогичных сталей без покрытия. В проведенных ранее исследованиях не уделялось должного внимания вопросу сохранения защитного покрытия в зоне сварки. В них рассматривались вопросы обеспечения стабильности сварочного процесса, недопущения непроваров, повышения стойкости сварочных электродов, поэтому большинство существующих способов контактной точечной сварки оцинкованных сталей направлено на максимальное разрушение и вытеснение цинкового покрытия из зоны сварки с целью уменьшения его влияния на качество и прочность сварного соединения [1, 2]. Резко снижающиеся при этом антикоррозионные свойства восстанавливают после сварки грунтовкой поверхностей их покраской и используют технологические приемы, снижающие экономические показатели процесса изготовления изделий и его эффективность. До настоящего времени не исследованы процессы, происходящие в зоне контакта электродов и изде-

лия, и аспекты сохранения антикоррозионных свойств покрытия в местах сварки, которые, несомненно, расширили бы область использования высокопроизводительного процесса контактной сварки.

Объектом данного исследования являются сварные соединения, выполненные контактной сваркой на сталях толщиной 0,5...2,0 мм с защитными цинкосодержащими покрытиями. Цель – разработка параметров технологического процесса контактной сварки оцинкованных сталей, обеспечивающих сохранение защитного покрытия, его антикоррозионных свойств и требуемых прочностных показателей сварных соединений.

Методика исследования

Исследования проводились на машинах для контактной сварки МТ-3201, МТ-1617. В процессе эксперимента непосредственно измерялись падения напряжений на участках электрод–электрод $U_{ээ}$ и электрод–деталь $U_{эд}$. Косвенным образом регистрировалась величина сварочного тока посредством использования датчика тока ДТПХ-32000, основанного на эффекте Холла. Датчик выполнен в виде выносного зонда, устанавливаемого на нижнем электроде контактной машины таким образом, чтобы силовые линии магнитного поля пересе-

кали его поверхность под прямым углом. Тарировка датчика ДТПХ-32000 осуществлялась по результатам измерения напряжения холостого хода на электродах сварочной машины и измерения параметров тока и напряжения в первичной цепи сварочного трансформатора машины. Для записи и обработки сигналов авторами использовано устройство NI USB 6009, содержащее аналого-цифровой преобразователь, осуществляющий дискретизацию аналогового сигнала.

Результаты исследований

Выбор допустимых значений падения напряжения и сопротивления в зоне контактов электродов и изделия. Зависимость сопротивления контакта от падения напряжения, согласно теории электрических контактов, называется r - u -характеристикой, которая дает представление о вполне определенных для данного сочетания металлов характерных значениях напряжения размягчения U_p и напряжения плавления $U_{пл}$. Напряжение размягчения U_p и напряжение плавления $U_{пл}$ являются характеристиками материала покрытия, связанными с изменениями его предела текучести σ_m , площади контактной поверхности S_k при нагреве и, как следствие, сопротивления в зоне контакта электродов с деталями $r_{\text{эо}}$ [3].

Для поддержания на желательном уровне температуры металла в контакте электрод-деталь, не приводящей к уменьшению σ_m ниже уровня действующих напряжений в указанной зоне, важно, чтобы фактическое падение напряжения не превышало напряжения размягчения цинкового покрытия. Соблюдение этого условия будет способствовать уменьшению деформации цинкового покрытия в месте контакта электродов и деталей и его выдавливания к периферии электродов. Для проверки предположения о возможности сохранения покрытия при определённых зна-

чениях электрических параметров были построены r - u -характеристики для двух случаев сварки: при нагреве материала покрытия до температуры выше температуры его плавления (рис. 1, а) и при нагреве материала покрытия до температуры его размягчения (рис. 1, б).

Результаты металлографических исследований и коррозионных испытаний сварных соединений, а также анализ результатов осциллографирования процессов сварки показали, что в тех случаях, когда на контактах электрод-деталь напряжение ниже напряжения размягчения U_p (для исследуемых покрытий $U_p = 0,17$ В), вытеснение цинко-содержащего покрытия незначительно (не превышало величины 20 % от толщины покрытия), а сварные соединения обладали требуемой коррозионной стойкостью. Следовательно, для сохранения покрытия необходимо, чтобы фактическое падение напряжения не превышало напряжения размягчения ($U_{\text{эо}} \leq 0,9U_p$).

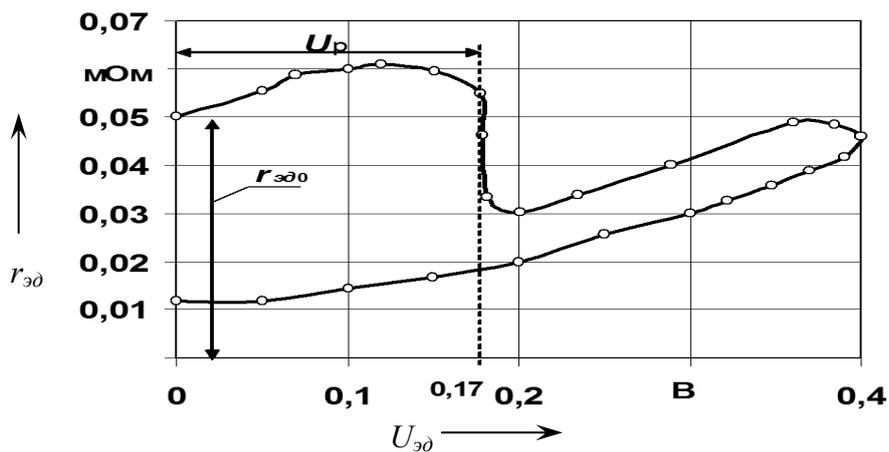
Величина и изменение сопротивления контакта $r_{\text{эо}}$ при сварке определяют условия тепловыделения в зоне контакта электрод-деталь. На начальной стадии протекания сварочного тока на долю контактного сопротивления приходится до 30 % тепловложения [4].

Значение сопротивления в контакте электрод-деталь можно определить по закону Ома

$$r_{\text{эо}} = \frac{U_{\text{эо}}}{I_{\text{св}}} \quad (1)$$

На основании экспериментальных измерений сварочного тока и металлографических исследований макрошлифов сварных соединений сталей с защитными цинковыми покрытиями была установлена корреляционная зависимость силы сварочного тока от толщины свариваемых пластин δ (рис. 2) с учётом требуемых размеров литой зоны d_y , которая по ГОСТ 15878-79 выбирается в зависимости от толщины свариваемых пластин δ .

а)



б)

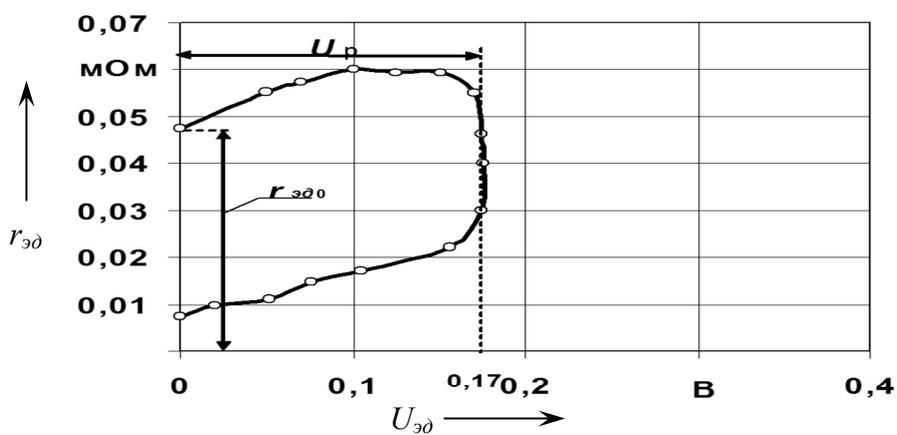


Рис. 1. Типичные r - u -характеристики контакта электрод-деталь: а – при разрушении покрытия; б – при сохранении покрытия

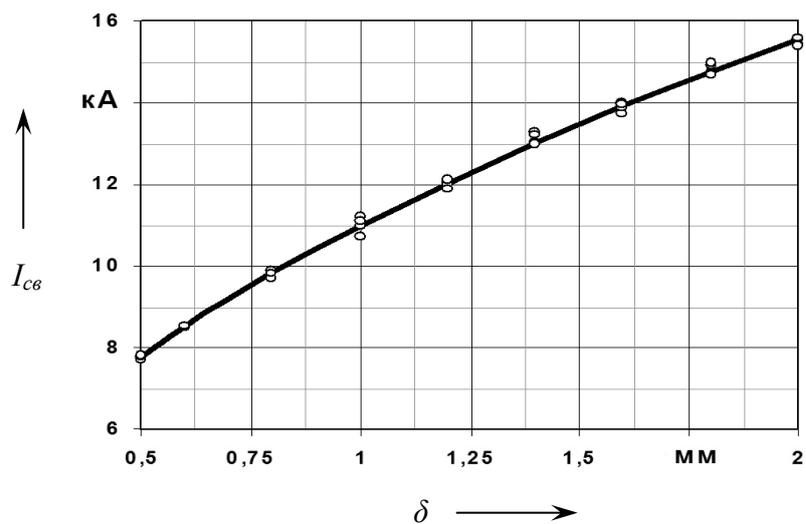


Рис. 2. Зависимость величины сварочного тока от толщины свариваемых пластин

Аппроксимирующая зависимость (см. рис. 2) была получена в результате экспериментального измерения сварочного тока (согласно плану эксперимента, количество дублирующих опытов – 7, количество уровней – 8). При этом был охвачен весь диапазон исследуемых толщин металла.

При помощи интерполяции методом наименьших квадратов была определена аппроксимирующая функция. При этом были рассмотрены различные аппроксимирующие функции (линейные, логарифмические, показательные). Представленная функция (2), обеспечивающая наибольший коэффициент корреляции, удобна для практического применения:

$$I_{ca} = 11\sqrt{\delta}. \quad (2)$$

С учетом ранее определенного значения падения напряжения в контакте электрод–деталь

$$U_{\partial\partial} = 0,9U_p. \quad (3)$$

Подставляя формулы (2) и (3) в формулу (1), получаем максимально до-

пустимое значение контактного сопротивления:

$$r_{\partial\partial} = \frac{0,082U_p}{\sqrt{\delta}}, \quad (4)$$

где $r_{\partial\partial}$ – сопротивление контакта электрод–деталь, мОм; δ – толщина свариваемого металла, мм; U_p – значение напряжения размягчения материала защитного покрытия, В; 0,082 – эмпирический коэффициент, $\frac{\text{мм}^{\frac{1}{2}}}{\text{А}}$.

Выбор формы и размеров рабочей поверхности сварочного электрода. Для определения влияния формы и размеров рабочей поверхности сварочных электродов на изменение сопротивления и падения напряжения в контакте электрод–деталь в процессе сварки проведены исследования при использовании электродов с различной формой рабочей поверхности. Применяемые электроды поделены на пять типов. Характеристики электродов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики сварочных электродов

Тип электрода	Характеристика электрода
<i>А</i>	Цилиндрический с конической заточкой, с рабочей поверхностью диаметром $d_p = 5$ мм
<i>Б</i>	Цилиндрический комбинированный, с плоской рабочей поверхностью диаметром $d_p = 60$ мм
<i>В</i>	Цилиндрический, с плоской рабочей поверхностью $d_p = 20$ мм
<i>Г</i>	Колпачковый, с рабочей частью $d_p = 5$ мм
<i>Д</i>	Цилиндрический с конической заточкой, со сферической рабочей поверхностью радиусом $R_p = 50$ мм

Полученные данные свидетельствуют о том, что использование электродов с плоской рабочей поверхностью при сварке приводит к снижению значений сопротивления и падения напряжения в контакте электрод–деталь (рис. 3), что способствует уменьшению тепловыделения на указанном участке.

Анализируя представленные дан-

ные, можно отметить, что во всех случаях, кроме сварки электродами с плоской рабочей поверхностью и увеличенной площадью контакта (электроды типов *Б* и *В*, кривые 2 и 3), на завершающем этапе сварки значение падения напряжения в контакте превышает значение напряжения плавления цинкового покрытия ($U_{nl} = 0,3$ В) и материал по-

крытия разрушается. Однако при использовании электродов типа *B* (кривая 3) напряжения выше, чем напряжение размягчения покрытия ($U_p = 0,17$ В), и

цинк вследствие резкого повышения пластических свойств выдавливается к периферии электродов.

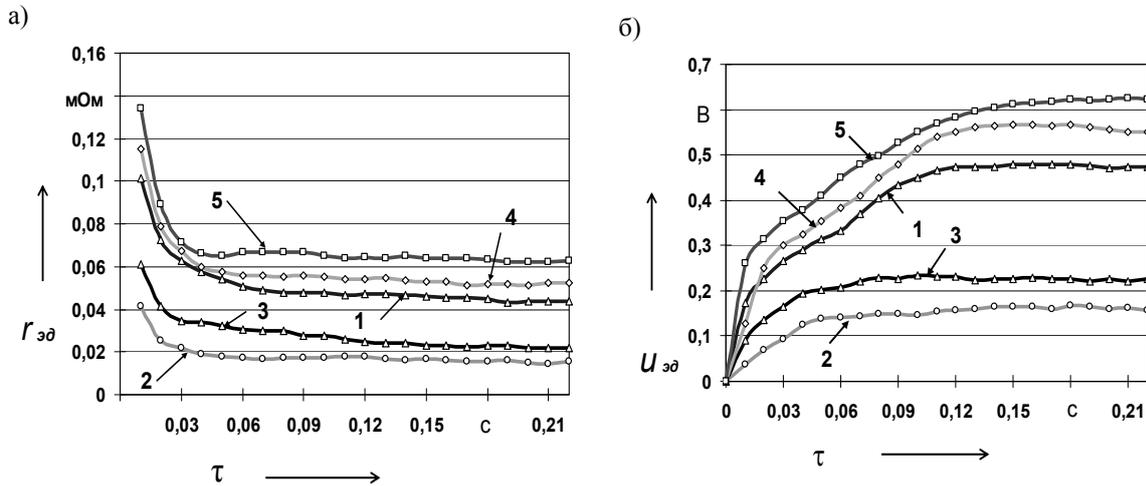


Рис. 3. Изменения сопротивления участка электрод-деталь $r_{эд}$ (а) и падения напряжения на участке электрод-деталь $u_{эд}$ (б) в процессе протекания сварочного тока при точечной сварке: 1 – электрод типа *A*; 2 – электрод типа *B*; 3 – электрод типа *B*; 4 – электрод типа *Г*; 5 – электрод типа *Д*

Значение контактного сопротивления в процессе сварки зависит не только от фактической площади контакта, но и от деформационной способности свариваемых пластин. Целесообразно рассмотреть данные факторы совместно. Для этого были проведены эксперименты, целью которых было установление влияния толщины свариваемой детали на величину контактного сопротивления участка электрод-деталь (рис. 4). Учитывая ранее полученные результаты, исследования не проводились для электродов типа *Г* и *Д*, т. к. при их использовании наблюдаются наибольшие значения сопротивлений на рассматриваемом участке.

С уменьшением толщины свариваемых листов происходит уменьшение как начального, так и конечного значений контактных сопротивлений. Для всех толщин листов от 0,5 до 2 мм наблюдается тенденция снижения кон-

тактного сопротивления на участке электрод-деталь при увеличении площади контактной поверхности электрода. Также, анализируя полученные данные, можно отметить, что для деталей с меньшей толщиной стабилизация контактного сопротивления наступает раньше. На основании полученных экспериментальных данных определены зависимости контактного сопротивления от площади рабочей поверхности электрода для указанных толщин свариваемых пластин (рис. 5).

Интерполяцией методом наименьших квадратов была установлена зависимость значения сопротивления в контакте электрод-деталь от площади рабочей поверхности электрода S_e и толщины свариваемых деталей δ с коэффициентом корреляции 0,98:

$$r_{эд} = 0,0166 + 0,0161\sqrt{\delta} - 0,00028\ln^2 S_e \quad (5)$$

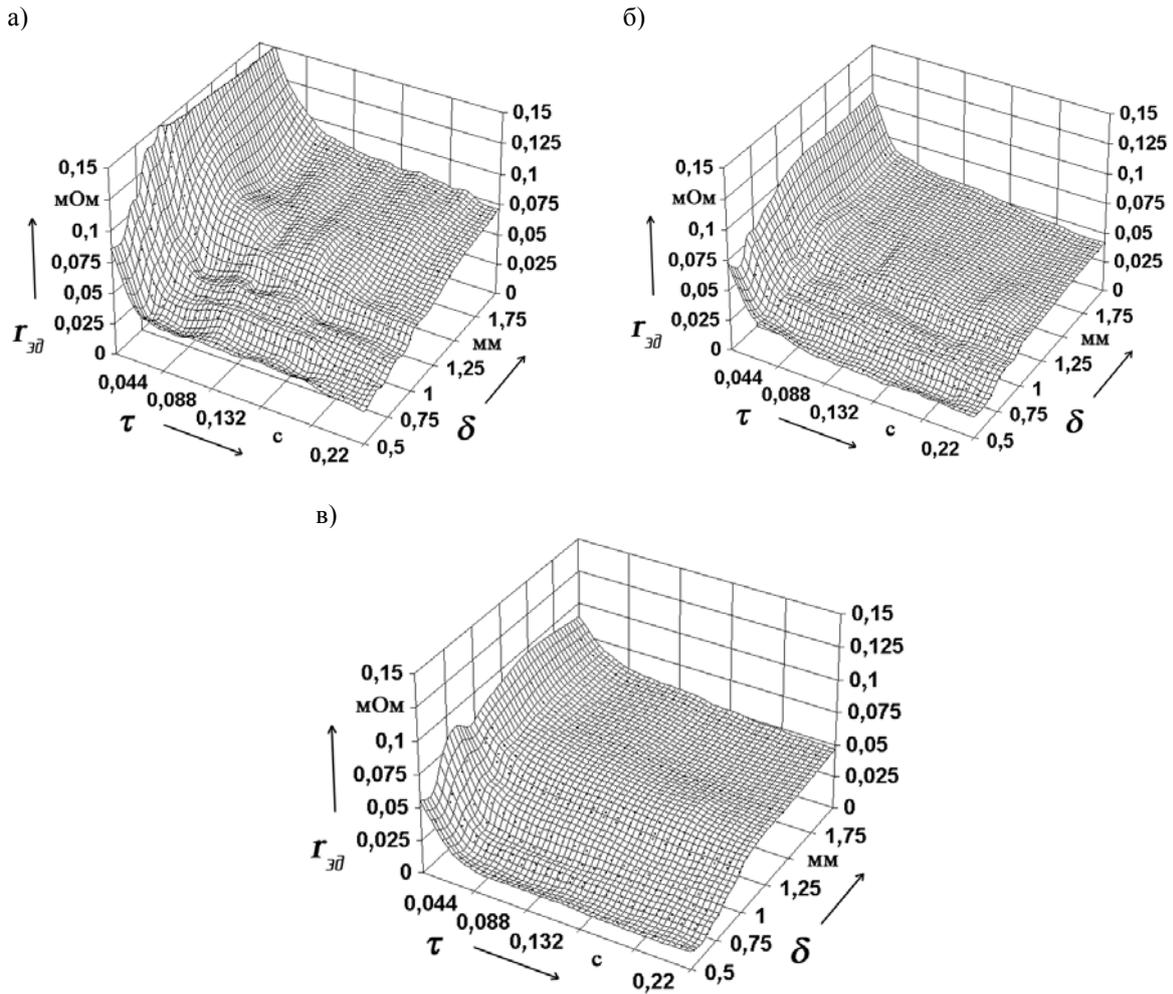


Рис. 4. Изменение сопротивления участка электрод–деталь $r_{эд}$ в процессе протекания сварочного тока от толщины свариваемых листов: а – электрод типа А; б – электрод типа В; в – электрод типа В

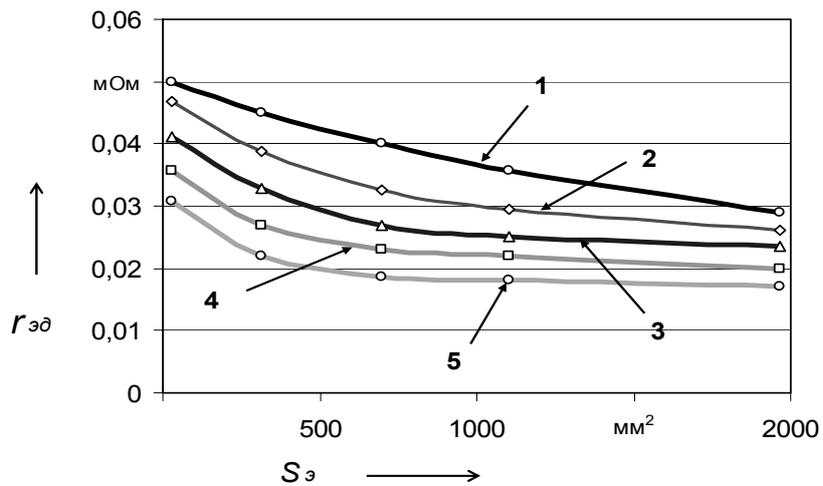


Рис. 5. Изменение сопротивления участка электрод–деталь $r_{эд}$ в зависимости от площади контактной поверхности электрода $S_{э}$ для различных толщин свариваемых листов δ : 1 – $\delta = 1,91$ мм; 2 – $\delta = 1,42$ мм; 3 – $\delta = 0,98$ мм; 4 – $\delta = 0,82$ мм; 5 – $\delta = 0,53$ мм

Приравняв значения сопротивления $r_{эд}$, полученные по формулам (4) и (5), имеем

$$0,0166 + 0,0161\sqrt{\delta} - 0,00028 \ln^2 S_s = \frac{0,082U_p}{\sqrt{\delta}}. \quad (6)$$

Выразив из формулы (6) площадь рабочей поверхности сварочного электрода S_s , получим

$$S_s = \exp \sqrt{58,2 - \frac{285U_p - 56\delta}{\sqrt{\delta}}}, \quad (7)$$

где δ – толщина свариваемого металла, мм; U_p – значение напряжения размягчения материала защитного покрытия, В; 285 – эмпирический коэффициент, $\frac{\text{мм}^2}{\text{В}}$; 56 – эмпирический коэффициент, $\frac{\text{В}}{\text{мм}^{7/2}}$; 58,2 – эмпирический коэффициент, мм.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что для сохранения цинкового покрытия на лицевых поверхностях изделий при контактной сварке необходимо, соблюдение следующих условий:

- падение напряжений на участках контактов электродов с изделием должно составлять не более $0,9 U_p$ (U_p – напряжение размягчения, В) материала покрытия;
- сопротивление контакта $r_{эд}$, мОм, не должно превышать величины, определяемой по формуле (4)

$$r_{эд} = \frac{0,082U_p}{\sqrt{\delta}}.$$

Установлено, что при контактной точечной сварке для сохранения покрытия целесообразно применять электроды с плоской формой рабочей поверхности. При точечной и рельефной сварке с использованием электродов увеличенных размеров площадь рабочей поверхности сварочного электрода S_s , мм², выбирается в соответствии с уравнением (7)

$$S_s = \exp \sqrt{58,2 - \frac{285U_p - 56\delta}{\sqrt{\delta}}}.$$

Использование разработанных технологических рекомендаций по выбору параметров процесса контактной сварки сталей с цинкосодержащими покрытиями позволяет сохранить покрытие, увеличить срок службы сварочных электродов и улучшить экологические условия работы сварщиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев, А. И. Технология точечной и рельефной сварки сталей в массовом производстве / А. И. Гуляев. – М. : Машиностроение, 1978. – 246 с. : ил.
2. Вакатов, А. В. Особенности формирования сварных соединений при контактной точечной сварке оцинкованной стали / А. В. Вакатов // Сварочное производство. – 2001. – № 2. – С. 20–21.
3. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М. : Иностран. лит-ра, 1961. – 464 с.
4. Гилевич, В. А. Особенности образования соединений при точечной сварке оцинкованной стали / В. А. Гилевич // Автоматическая сварка. – 1973. – № 8. – С. 18–21.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 17.01.2011

S. N. Emeljanov, V. A. Popkovsky,
A. A. Katkalo, A. O. Koroteyev
About the choice of mode parameters at
resistance spot welding of zinc coated steels
with covering preservation

The condition of preservation of protective zinc covering in places of electrode contacts with a detail at resistance spot welding of zinc coated steels has been defined. The character of resistance change and voltage failure in contact of the electrode with the detail at use of electrodes with the various forms of the working surface has been studied and empirical formulas for choosing the parameters of the welding mode have been offered.

УДК 621.83.06

А. В. Капитонов, канд. техн. наук, доц.**ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ И ДОПУСКИ ПЛАНЕТАРНЫХ РОЛИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ**

В статье представлены разработанные параметры для норм кинематической точности, плавности работы, контакта сателлитов и зазоров в зацеплении планетарных роликовых передач на основе теоретических и экспериментальных исследований. Разработана система допусков на нормируемые показатели точности по базовой степени. Представлена таблица показателей точности и допусков для планетарной роликовой передачи с симметрично нагруженными сателлитами.

В основе выбора показателей точности (параметров) для нормы кинематической точности приняты те погрешности планетарной роликовой передачи [1], которые вызывают неравномерность вращения за полный оборот выходного вала, а для нормы плавности работы приняты погрешности передачи, которые также влияют на кинематическую точность, но проявляются многократно за один оборот выходного вала.

Комплексным показателем кинематической точности принят параметр *кинематическая погрешность передачи* $F_{к.п}$ [2].

Кинематическая погрешность передачи принимается как разность между действительным и номинальным углами поворота выходного вала за полный цикл вращения, который равен наименьшим целым числам полных оборотов входного и выходного валов:

$$F_{к.п.} = \varphi_2 - \varphi_3, \quad (1)$$

где φ_2 – действительный угол поворота выходного вала; φ_3 – номинальный угол поворота выходного вала,

$$\varphi_3 = \varphi_1 / (1 + z_2), \quad (2)$$

где φ_1 – угол поворота входного вала; z_2 – число периодов неподвижной дорожки.

Как видно из формулы (2), полному обороту выходного вала всегда будет соответствовать целое число оборотов входного вала. Поэтому цикл вращения

передачи равен полному обороту выходного вала.

На рис. 1 показана *наибольшая кинематическая погрешность передачи* $F_{iо}$ как наибольшая разность значений кинематической погрешности за один оборот выходного вала.

В зависимости от методов и средств измерения точность кривых кинематической погрешности зависит от числа измерений. Это связано с приборами, основанными на принципе измерения равномерных действительных углов поворота ведущего звена. При этом точность измерения наибольшей кинематической погрешности зависит от шага угла поворота ведущего звена. При небольшом числе измерений кинематической погрешности не будут учитываться высокочастотные погрешности передачи.

Разложение функции кинематической погрешности на гармонические составляющие дает спектр амплитуд. Амплитуда первой гармоники характеризует радиальные и тангенциальные погрешности ведомого звена. Наибольшие из амплитуд принимаются исходными погрешностями при нормировании показателей кинематической точности планетарной роликовой передачи.

Амплитуды гармоник со вторым и большими номерами характеризуют циклические погрешности, наибольшие из которых приняты исходными погрешностями при нормировании плавности работы передачи (рис. 2) [3].

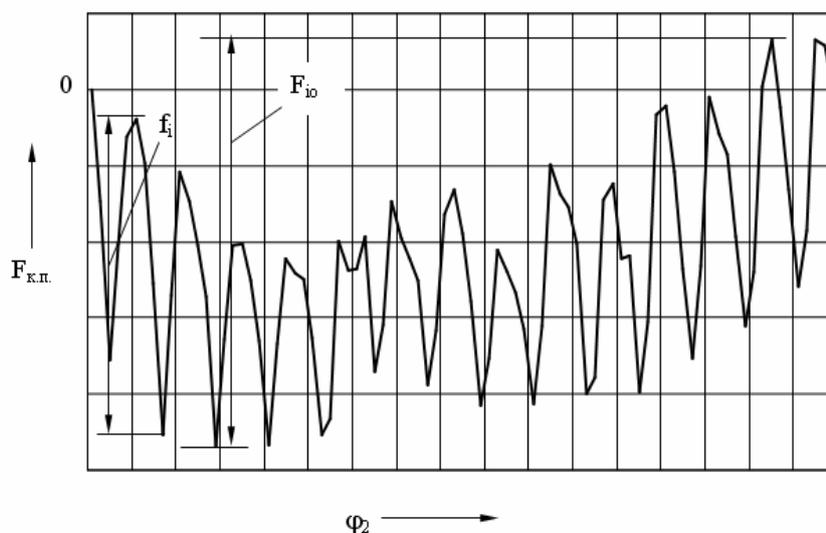


Рис. 1. Наибольшая кинематическая погрешность передачи и наибольшая местная кинематическая погрешность

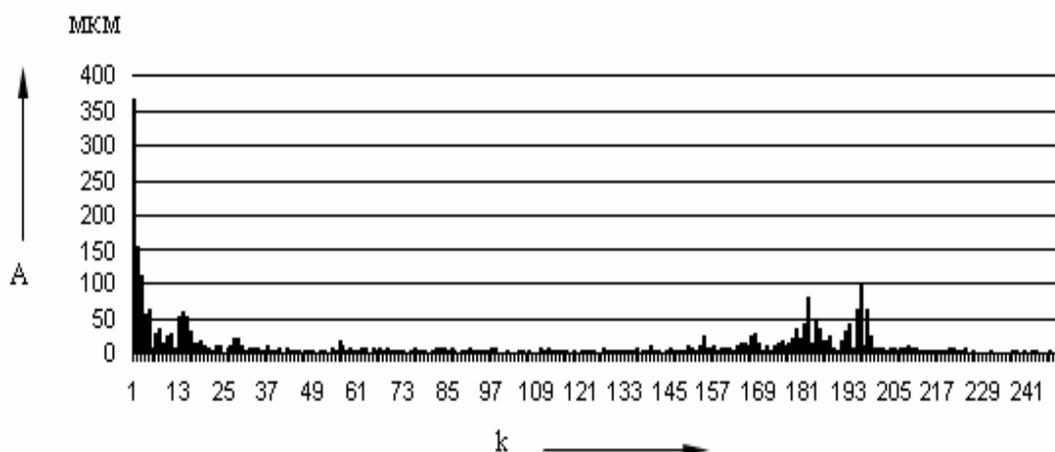


Рис. 2. Спектр амплитуд кинематической погрешности планетарной роликовой передачи

На графике по оси ординат показаны значения амплитуд гармоник A в линейных величинах, приведенных к радиусу $r = 100$ мм. По оси абсцисс показаны номера гармоник k .

Для нормы кинематической точности разработаны дифференцированные показатели, характеризующие радиальные и тангенциальные погрешности ведомого звена: *накопленная погрешность шага многопериодной до-*

рожки F_p , смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси детали F_r , погрешность обработки многопериодной дорожки F_c .

Накопленная погрешность шага многопериодной дорожки F_p – разность между действительным и номинальным накопленными шагами. Накопленную погрешность шага можно определить по формуле

$$F_p = (p_{2n} - np_3) / R, \quad (3)$$

где p_{2n} – действительный накопленный шаг; p_3 – номинальный шаг; R – радиус средней окружности; n – номер шага.

Шаг многопериодной дорожки p – расстояние между одноименными внешними или внутренними поверхностями дорожки, измеренное по окружностям любого радиуса в пределах размаха кривой, равного $2A + 2h$, где A – амплитуда многопериодной кривой; h – расстояние по нормали между многопериодной кривой и верхней или нижней эквидистантой (половина ширины канавки). Таким образом, шаг может из-

меряться как по внешней, так и по внутренней поверхностям дорожки на различных ее участках. При этом отдельно рассматривается шаг дорожки по двум средним окружностям (для внешней и внутренней поверхностей) как параметр, наиболее удобный при нормировании погрешностей деталей с многопериодными дорожками.

Номинальный шаг дорожки

$$p_3 = 2\pi R / z_2. \quad (4)$$

Схема нормирования шага многопериодной дорожки представлена на рис. 3.

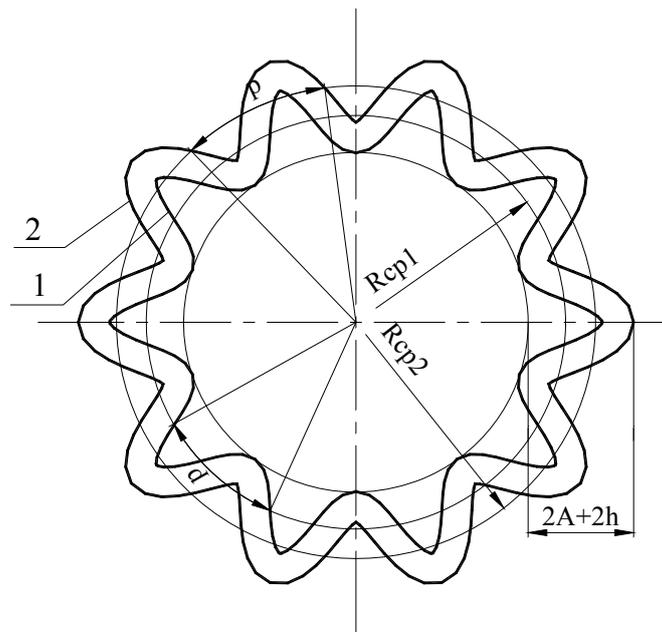


Рис. 3. Схема нормирования шага многопериодной дорожки: 1 – внутренняя поверхность; 2 – внешняя поверхность; R_{cp1} – радиус средней окружности для внутренней поверхности; R_{cp2} – радиус средней окружности для внешней поверхности

Наибольшее значение накопленной погрешности шага F_{pmax} определяется как наибольшая разность значений F_p (рис. 4).

Накопленная погрешность шага включает как радиальные, так и тангенциальные погрешности деталей с многопериодными дорожками. Вследствие этого накопленная погрешность учиты-

вает погрешность установки детали на станке при обработке дорожки, погрешности станка, а также погрешность формы базового отверстия детали. В то же время погрешность обработки многопериодной дорожки F_c характеризует только тангенциальную составляющую, связанную непосредственно с неточностями станка, на котором производится

фрезерование многопериодной канавки, и режущего инструмента. Эту погрешность можно определить, исключив из первой гармоники кинематической по-

грешности передачи величину амплитуды, связанную с погрешностью установки детали.

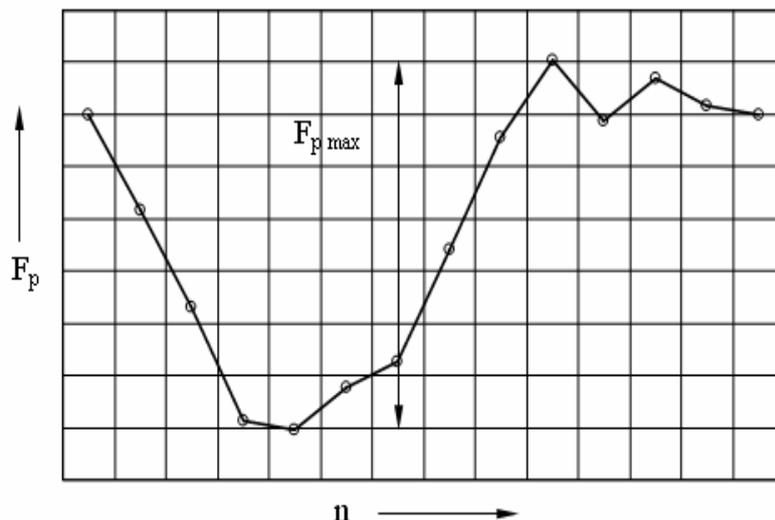


Рис. 4. Наибольшее значение накопленной погрешности шага

Смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси детали F_r – расстояние между осью вращения детали с многопериодной дорожкой и осью средней окружности многопериодной дорожки на участке, равном ширине детали.

Разработка показателей для нормы плавности работы передачи связана с циклическими погрешностями, т. е. погрешностями, которые многократно повторяются за оборот выходного вала передачи. К ним относятся следующие показатели.

Местная кинематическая погрешность передачи f_i определяется как наибольшая разность между местными экстремальными значениями кинематической погрешности (см. рис. 1).

Среднее значение местных кинематических погрешностей передачи f_{icp} определяется как среднее арифметическое всех местных экстремальных значений кинематической погрешности за полный оборот выходного вала.

Как показывают эксперименты, среднее значение местных кинематических погрешностей передачи связано с высокочастотными погрешностями. Этот показатель можно определить по величине амплитуд высокочастотных гармоник. Если передача не имеет дисбаланса, то высокочастотные гармоники проявляются незначительно и в большей степени выражены гармоники средней частоты, равной значениям передаточного отношения и числу периодов дорожки. Так, при измерениях в статике среднюю местную кинематическую погрешность можно определять по амплитуде гармоники с периодом $2\pi/(z_1 + z_2)$ как циклическую погрешность. При этом на графиках кинематической погрешности выделяются $2\pi/(z_1 + z_2)$ периодов, каждый из которых соответствует одному обороту ведущего звена.

Местная кинематическая погрешность f_i , как следует из ее определения, больше среднего значения f_{icp} местной кинематической погрешности.

Радиальные погрешности ведущего звена связаны с погрешностью эксцентриситета эксцентрика, установленного на ведущем валу, погрешностями радиусов ведущих колец, погрешностями диаметров роликов, погрешностью ширины канавки. Исходя из этого, разработаны следующие параметры: погрешность эксцентриситета ведущего звена f_e , погрешность радиусов рабочих поверхностей одноперiodной дорожки f_{rad} , погрешность диаметров роликов f_d , погрешность ширины многоперiodной дорожки f_h .

Эти погрешности отражают неточности размеров рабочих поверхностей деталей зацепления простой геометрической формы и не требуют специальной формулировки.

На основные тангенциальные погрешности ведущего звена установлены следующие показатели.

Погрешность шага многоперiodной дорожки f_p – наибольшее отклонение действительного шага от номинального, приведенного к радиусу средней окружности:

$$f_p = (p_2 - 2\pi n / z_2)R, \quad (5)$$

где p_2 – действительный шаг дорожки.

Многоперiodная дорожка представляет собой периодическую канавку синусоидального или другого типа, замкнутую на плоскости. При ее изготовлении высокочастотные погрешности станков, на которых производится обработка дорожек, передаются на обрабатываемую деталь, в результате чего появляется волнистость рабочего профиля дорожки.

Погрешность профиля дорожки f_f – наибольшая разность отклонений действительного профиля дорожки от номинального, измеренных по нормали к номинальному профилю.

Погрешность профиля можно измерять как разность шагов p многоперiodной дорожки в пределах каждого периода на нескольких окружностях

различного радиуса. При этом наибольшая погрешность профиля определяется как наибольшая разность шагов по всему диску.

Для нормы контакта роликов разработаны следующие показатели: отклонение от радиального расположения пазов дисков-сепараторов в передаче f_{rs} , торцовое биение дисков-сепараторов f_b , отклонение от перпендикулярности рабочих поверхностей многоперiodной дорожки относительно базового торца детали f_n .

Основным комплексным показателем, характеризующим величину контакта роликов в зацеплении, является отклонение от радиального расположения пазов дисков-сепараторов в передаче f_{rs} . Этот показатель характеризует погрешности расположения пазов двух симметрично расположенных дисков-сепараторов в собранной передаче. При этом под точным расположением пазов подразумевается такое их расположение, при котором пазы обоих дисков-сепараторов будут точно совпадать, если их наложить один на другой.

Несимметричное расположение пазов в сепараторах приводит к перекоосу роликов, уменьшению их площади контакта с пазами и рабочими поверхностями многоперiodной дорожки, а также неравномерному износу всех деталей зацепления.

Чтобы обеспечить точное расположение пазов обоих сепараторов, необходимо учесть следующие погрешности этих дисков: отклонение от симметричности пазов каждого из дисков, относительное смещение осей отверстий под штифты дисков-сепараторов для их соединения, погрешность расположения отверстий под штифты дисков-сепараторов относительно оси симметрии паза.

Торцовое биение дисков-сепараторов f_t также характеризует величину контакта роликов и зазоры в передаче. Оно предусматривает наибольшее значение в пределах всей торцовой поверхности сепаратора.

Отклонение от перпендикулярности рабочих поверхностей многопериодной дорожки относительно базового торца детали f_n характеризует площадь контакта роликов с рабочими поверхностями многопериодной дорожки в передаче в сборе.

Кроме установленных выше показателей точности, на величины сопрягаемых поверхностей роликов с деталями зацепления передачи также будут влиять погрешности, нормируемые по нормам плавности и нормам бокового зазора. Эти погрешности связаны между собой. Погрешности, уменьшающие величину контакта роликов, приводят к понижению плавности работы и увеличению зазоров в передаче.

При установлении параметров на минимальный боковой зазор между сателлитами и деталями зацепления рассматривались следующие зазоры в передаче: зазор между роликами и рабочими поверхностями многопериодной дорожки, зазор между роликами и ведущими кольцами однопериодной дорожки, зазор между роликами и поверхностями прорезей диска-сепаратора.

Между деталями зацепления установлены минимальные боковые зазоры. Каждый минимальный боковой зазор определяется по формуле

$$j_{\min} = j' + j'', \quad (6)$$

где j' – величина бокового зазора, соответствующая температурной компенсации диска с многопериодной дорожкой; j'' – величина бокового зазора, обеспечивающая нормальные условия смазки. Значения j' и j'' рассчитываются в соответствии с [2].

Минимальные зазоры между роликами и каждым звеном зацепления в отдельности $j_{\min i}$ обеспечиваются допусками на детали зацепления при нормировании по нормам плавности. Также установлены показатели – минимальный зазор в собранной передаче j_{\min} , который необходимо контролировать в передаче

в сборе, и максимальный зазор j_{\max} , который учитывает погрешности изготовления и сборки деталей передачи, входящих в размерную цепь при расчете максимального зазора.

Для обеспечения максимального зазора компенсирующим звеном принята ширина прорезей дисков-сепараторов, которую необходимо увеличить на величину погрешностей составляющих звеньев передачи при ее сборке. Увеличение размеров прорезей дисков-сепараторов дает меньшие кинематические погрешности передачи, чем изменение размеров других деталей, если их использовать как компенсирующее звено.

В табл. 1 представлены допуски на основные показатели для норм кинематической точности и полноты контакта роликовой передачи, установленные в результате теоретических и экспериментальных исследований [3, 4], с параметрами зацепления: $u = 14$, $z_2 = 13$, $R = 60$ мм, $A = 10$ мм для дорожек, обрабатываемых фрезерованием с последующей приработкой редуктора. Допуски представлены в угловых и линейных величинах, приведенных к радиусу средней окружности многопериодной дорожки $R = 60$ мм. Их можно сопоставить с допусками на зубчатые передачи для 8 степени точности.

Для перехода к другим степеням точности приняты коэффициенты из ряда R20 предпочтительных чисел 1,6; 1,40 и 1,25. Для показателей, характеризующих погрешности деталей с многопериодными дорожками (погрешность станка, накопленная погрешность и погрешность шага многопериодной дорожки, а также погрешность профиля дорожки), назначены коэффициенты по тому же принципу, что и для зубчатых колес: при переходе к более грубым степеням точности коэффициент уменьшается. Так, при переходе от 6 к 8 степени принят коэффициент 1,6, от 8 к 10 – коэффициент 1,40 и от 10 к 12 – коэффициент 1,25. Это связано с технологически оправданными соотноше-

ниями между допусками разных степеней точности для деталей с многопериодными дорожками.

Как показали экспериментальные исследования, накопленная погрешность шага и погрешность профиля многопериодной дорожки мало зависят от числа периодов дорожки и величины

ее амплитуды. Поэтому показатели точности в табл. 1, характеризующие погрешности деталей с многопериодными дорожками и представленные в угловых величинах, можно использовать для таких же деталей с другими геометрическими параметрами.

Табл. 1. Допуски на показатели точности планетарных роликовых симметрично нагруженных передач

Показатель точности	Буквенное обозначение	Значение, мкм (угл. мин)
<i>Кинематическая точность</i>		
Кинематическая погрешность передачи	$F_{к.п.}$	330 (18,9)
Накопленная погрешность шага многопериодной дорожки	F_p	143 (8,2)
Погрешность обработки многопериодной дорожки	F_c	140 (8)
Смещение средней окружности многопериодной дорожки относительно геометрической оси детали	F_r	25
<i>Плавность работы</i>		
Местная кинематическая погрешность передачи	f_i	140 (8)
Среднее значение местных кинематических погрешностей передачи	f_{icp}	52 (3)
Погрешность шага многопериодной дорожки	f_p	122 (7)
Погрешность профиля многопериодной дорожки	f_f	37 (2,1)
Погрешность радиусов рабочих поверхностей колец, образующих однопериодную дорожку:	f_{rad}	
отклонение диаметра внутреннего кольца однопериодной дорожки		h7
отклонение диаметра внешнего кольца однопериодной дорожки		H8
Погрешность диаметров роликов	f_d	h7
Погрешность ширины многопериодной дорожки	f_h	H10

Представленный в табл. 1 в угловых величинах допуск на кинематическую погрешность передачи можно использовать при контроле планетарных роликовых передач с любыми передаточными отношениями.

Выводы

1. Разработанные показатели точности характеризуют наиболее значимые погрешности деталей зацепления планетарной роликовой передачи, что

позволяет наиболее полно оценить точность этих передач, разработать технологические процессы обработки их деталей и сборки, оценить эксплуатационные характеристики.

2. Установленные допуски на показатели точности планетарных роликовых передач могут быть использованы при их изготовлении, а также при их сравнении с зубчатыми передачами по кинематической погрешности, выраженной в угловых величинах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пашкевич, М. Ф.** Планетарные шариковые и роликовые редукторы и их испытания / М. Ф. Пашкевич, В. В. Геращенко. – Минск : БелНИИНТИ, 1992. – 248 с.

2. **Тайц, Б. А.** Точность и контроль зубчатых колес / Б. А. Тайц. – М. : Машиностроение, 1972. – 367 с.

3. Управление точностью планетарных роликовых передач на основе их моделирования

и спектрального анализа кинематических погрешностей / М. Ф. Пашкевич [и др.] // Изв. Белорус. акад. наук. – 2002. – № 1 (13). – С. 45–52.

4. **Капитонов, А. В.** Методика оценки и анализ кинематических погрешностей планетарных роликовых передач / А. В. Капитонов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 2. – С. 88–97.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 25.03.2011

A. V. Kapitonov
Accuracy indicators and tolerances
for planetary roller drives

The developed parameters for norms of kinematic accuracy, smoothness of work, contact of satellites and backlashes in gearing of planetary roller drives on the basis of theoretical and experimental researches are presented in the article. The system of tolerances on normalized accuracy indicators on base degree has been developed. The table of accuracy indicators and tolerances for planetary roller drive with symmetrically loaded satellites is presented.

УДК 631.372 (662.6/8)

**А. Н. Карташевич, д-р техн. наук, проф., В. А. Белоусов, канд. техн. наук, доц.,
В. С. Товстыка**

ИЗМЕНЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАКТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМА ЕГО РАБОТЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ

В статье приводятся результаты теоретических исследований по обоснованию необходимости изменения концентрации рапсового масла в смесевом топливе в зависимости от режима работы трактора, представлена аналитическая зависимость, позволяющая обосновать необходимость изменения концентрации рапсового масла в смесевом топливе в зависимости от режима работы трактора и связывающая динамическую испаряемость топлива с приведенным вихревым отношением, скоростью движения трактора и силой тяги на крюке.

Введение

Самостоятельно трактор не выполняет никаких агротехнических операций. Он работает только с навесными или прицепными машинами, являясь, таким образом, составной частью машинно-тракторного агрегата. Поэтому при рассмотрении тяговых характеристик трактора всегда следует учитывать влияние агрегируемой машины.

При неустановившемся движении трактора с колёсной формулой 4×2 в агрегате с прицепными или навесными машинами на трактор действуют следующие силы и моменты: масса отдельных частей трактора и навесной машины, силы инерции агрегата и моменты касательных сил инерции вращающихся масс трактора и агрегата в целом, тяговые сопротивления агрегируемой машины, сопротивление воздуха и реакция грунта на движитель [1, с. 68–69].

Развиваемый двигателем крутящий момент передаётся через механизмы трансмиссии к ведущим колёсам. Движение трактора происходит за счёт возникновения касательной силы тяги P_k между движителем трактора и грунтом.

В качестве силовой установки тракторов в основном используют дизельные двигатели. Крутящий момент в силовой установке возникает за счёт преобразования химической энергии

топлива в механическую энергию вращения коленчатого вала. Крутящий момент на каждом из режимов работы дизеля определяется количеством энергии, вводимой в цилиндр с цикловой дозой топлива. При изменении химического состава и физических свойств топлива протекание процессов впрыскивания, распыливания и смесеобразования изменится, что повлечёт за собой изменение крутящего момента силовой установки, тяговых и топливно-экономических качеств трактора.

Влияние трактора на окружающую среду в период его эксплуатации разносторонне. Трактор уплотняет почву, создаёт шум, выбрасывает в атмосферу всевозможные вредные вещества.

При движении трактора по полю его движитель образует пятно контакта, через которое происходит передача массы машины на землю, что приводит к её уплотнению. Неоднократное воздействие движителей на почву приводит к накоплению деформации не только в пахотных, но и в подпахотных горизонтах (0,4...0,6 м). Переуплотнение в подпахотном слое препятствует проникновению влаги в глубь почвы и приводит к водной эрозии или заболачиванию. При нарушении притока влаги из более глубоких слоёв к поверхности может происходить быстрое высыхание почвы и ветровая эрозии. Такого

рода нарушения приводят к тому, что корневая система растений недополучает воду из подпахотного слоя, и происходит снижение урожая сельскохозяйственных культур [2, с. 7].

Негативно воздействуют на окружающую среду и здоровье оператора шумы, производимые трактором. Источниками шума на тракторе являются двигатель, агрегаты трансмиссии, системы впуска и выпуска двигателей, вентиляторы системы охлаждения. Шум вызывает утомляемость механизатора, а при длительном воздействии – профессиональные заболевания, являясь одной из причин снижения производительности труда. Звуковые вибрации конструкции (структурный шум) при непосредственном воздействии также оказывают вредное влияние на человека, кроме того, могут вызывать ослабление крепежа, усталостные поломки, выход из строя контрольно-измерительных и осветительных приборов и т. д. [3, с. 238–243].

Наибольший вред окружающей среде при эксплуатации трактора приносит его силовая установка. Отработавшие газы (ОГ) дизелей содержат более 1000 токсичных компонентов, большую часть из которых представляют различные углеводороды. Токсичные вещества дизелей составляют 0,02...1 % объема ОГ. Токсичные компоненты ОГ силовых установок тракторов наносят значительный вред здоровью человека. Продукты сгорания топлива могут накапливаться в воде, растениях и почве [4]. В воздухе они могут превращаться в другие вещества, которые в определенных условиях могут быть более токсичными, чем исходные продукты.

Загрязнение окружающей среды токсичными компонентами ОГ силовых установок тракторов приводит к снижению продуктивности животноводства и ухудшению качества продукции. При подвозе кормов транспорт с дизельными двигателями входит в животновод-

ческие помещения. Опасные для живых организмов газы собираются внизу, образуя смоги, которые беспокоят животных, действуют на их аппетит, снижают удои и привесы [5].

Воздействие ОГ ДВС на растительность обусловлено попаданием ОГ как на поверхность растений, так и в клетки (с почвенными водами). Особенно растения чувствительны к оксидам серы, оксидам азота, а также к соединениям оксидов азота с углеводородами.

Состав ОГ тракторов в большой мере зависит от типа используемого топлива. В настоящее время перспективные моторные виды топлива – рапсовое масло и его смеси с дизельным топливом. Рапсовое масло имеет ряд достоинств: оно не токсично и не огнеопасно, не содержит сернистых соединений, является возобновляемым топливом. Использование его в тракторах возможно и перспективно [6]. Поскольку адаптировать новые топлива к существующим тракторам достаточно сложно, целесообразно оценить приспособляемость силовых установок тракторов к альтернативным видам топлив. С этой целью необходимо выявить зависимости показателей работы трактора от показателей качества топлива.

Основная часть

Практически во всех существующих дизелях, реализующих смесеобразование от объёмного до пристеночного, процесс смешения топлива с воздухом является определяющим для обеспечения полного и эффективного сгорания. Горение в дизелях в основном можно охарактеризовать как процесс, регулируемый смешением топлива, т. е. время, требуемое для этой стадии, больше времени химического реагирования [7, с. 176].

Анализируя процессы смесеобразования, используем относительную оценку его совершенства как условие достижения минимального удельного

расхода топлива и минимального содержания сажи в ОГ [7].

Известно [7, 8], что любую существующую модель дизеля с присущими ей параметрами смесеобразования, топливоподачи и конструкции можно оценить по степени доведенности рабочего процесса или совершенства смесеобразования, т. е. степени согласования интенсивности вихревого движения заряда, длительности впрыскивания и угла раскрытия топливных струй. В [9] предложено для оценки степени доведенности рабочего процесса использовать отношение δ/δ_o . Для дизелей с наддувом это соотношение примет вид [7, с. 149]:

$$k = \delta \cdot \sqrt[4]{\pi_k} / \delta_o, \quad (1)$$

где δ – приведенное вихревое отношение; π_k – степень повышения давления при наддуве; δ_o – расчётный параметр.

При работе на чистом дизельном топливе (ДТ) для дизелей существует частота вращения, при которой удельный расход топлива и содержание сажи в отработавших газах стремятся к минимуму. Также можно предположить, что на этом режиме и другие токсичные компоненты ОГ будут минимальны. Для этого режима с достаточной степенью точности справедливо выражение [7; 9, с. 149, 179]

$$k = \delta \cdot \sqrt[4]{\pi_k} / \delta_o \rightarrow 1. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что существует соотношение между скоростью вихревого движения заряда в КС, количеством и степенью испарения топлива, обеспечивающее оптимальное смесеобразование и наименьшие параметры топливной экономичности и токсичности ОГ.

В [8] предложено это соотношение характеризовать параметром

$$Z = \omega_{kc} / (m_v / q_u)_{\text{впр}}, \quad (3)$$

где ω_{kc} – максимальная скорость вихря в КС в ВМТ; m_v – количество испарившегося топлива в момент окончания впры-

скивания; q_u – цикловая подача топлива топливным насосом высокого давления, см³/цикл.

При изменении режима работы дизеля изменяется и значение этого параметра. Однако при переходе на другие частоты вращения должно выполняться условие

$$\delta n / (m_v / q_u)_{\text{впр}} \approx \text{idem}, \quad (4)$$

где $(m_v / q_u)_{\text{впр}}$ – динамическая испаряемость топлива за время, соответствующее $\varphi_{\text{впр}}$ [10, с. 58].

Рассмотренные нами соотношения свидетельствуют о том, что при изменении режима работы дизеля или при переходе его работы на другие виды топлива нарушается оптимальное протекание процессов смесеобразования и сгорания. Достижение минимального значения g_e в этих случаях будет наблюдаться при выполнении условия (4). При этом значение безразмерного параметра $\delta n / i_{v,i}$ нужно выбирать для режима, где $k \rightarrow 1$ [7].

Приведенное вихревое отношение можно определить, согласно [9], из выражения

$$\delta = (\omega_{kc} / \omega_{\text{дв}}) \cdot (d_{kc} / d)^2, \quad (5)$$

где d – диаметр цилиндра; d_{kc} – диаметр камеры сгорания; $\omega_{\text{дв}}$ – угловая частота вращения коленчатого вала двигателя; ω_{kc} – максимальная скорость вихря в КС в ВМТ [7],

$$\omega_{kc} = \omega_u (d / d_{kc})^2 \cdot (d_{kc} / d)^{(0,047\Gamma_{cp})0,83} \times \\ \times 0,77 d^{0,05} / (1 + \gamma_{ост}), \quad (6)$$

где $\gamma_{ост}$ – коэффициент остаточных газов; Γ_{cp} – циркуляция вектора скорости [7, с. 142],

$$\Gamma_{cp} = \frac{1}{2} \pi \cdot \omega_u \cdot d^2, \quad (7)$$

где ω_u – угловая скорость вращения заряда в цилиндре в конце такта впуска.

Параметр δ_o определяется по формуле [9]

$$\delta_o = \sqrt{\delta_{co} \cdot \delta_y}, \quad (8)$$

где δ_{co} – приведенное вихревое отношение, соответствующее повороту вихря за время впрыскивания,

$$\delta_{co} = 360 / (i_{co}\varphi_{впр}), \quad (9)$$

где i_{co} – число сопловых отверстий штатной форсунки; $\varphi_{впр}$ – угол, соответствующий впрыскиванию; δ_γ – приведенное вихревое отношение,

$$\delta_\gamma = 2 / \pi \cdot S / d \cdot \ln(90 / (180 - \gamma_\epsilon)), \quad (10)$$

где S – ход поршня.

Суммарный угол раскрытия топливных струй γ_ϵ определяется по формуле [9]

$$\gamma_\epsilon = 180 - 90 \exp[-d_{kc} / d \times (1 + \pi / 2 \cdot d / s \cdot \delta)]. \quad (11)$$

Результаты расчётов по формулам (1)...(11) сведены в табл. 1.

Анализ данных расчета параметра k по выражениям (4)...(9), приведенных в табл. 1, показывает справедливость зависимости (2).

Табл. 1. Данные расчета параметров взаимосвязи показателей качества топлива с параметрами рабочего цикла дизеля

n , мин ⁻¹	d_{kc} , м	d , м	i_{co}	ω_{kc} , с ⁻¹	$\omega_{дог}$, с ⁻¹	δ	γ_ϵ , град	δ_γ	δ_{co}	δ_o	k
1800	0,038	0,11	5	1478	188,4	1,96	165,92	1,34	4	2,32	1,0081
1700	0,038	0,11	5	1368	177,9	1,92	165,53	1,32	4	2,30	0,9952
1600	0,038	0,11	5	1297	167,5	1,94	165,67	1,33	4	2,31	0,9979
1500	0,038	0,11	5	1208	157,0	1,92	165,55	1,32	4	2,30	0,9854
1400	0,038	0,11	5	1116	146,5	1,90	165,35	1,31	4	2,29	0,9731
1200	0,038	0,11	5	1068	125,6	2,13	167,43	1,42	4	2,39	1,0314

Действительно, значение k наиболее близко к 1 при частоте вращения 1600 мин⁻¹, что согласуется со стендовыми испытаниями двигателя. При данной частоте вращения удельный расход топлива минимальный и значения выбросов токсичных компонентов низкие.

Перевод дизеля на работу на смешанные топлива на основе РМ будет сопровождаться неизбежным нарушением оптимального процесса смесеобразования.

В [9] показано, что уменьшение испаряемости топлива при утяжелении его фракционного состава позволяет повысить потребную скорость движения воздушного заряда.

Согласно [7], изменение удельного расхода топлива по скоростной характеристике меняется в зависимости от испаряемости топлива примерно в соответствии с выражением

$$\omega_{kc} \cdot i_{v,i} \approx idem, \quad (12)$$

где $i_{v,i}$ – доля испарившегося топлива за ПЗВ (динамическая испаряемость топлива) [10, с. 58], $i_{v,i} \approx m_{v,i} / q_u$.

Минимум удельного расхода топлива по скоростной характеристике с утяжелением фракционного состава топлива смещается в сторону больших частот вращения.

Согласно [7, с. 233], динамическая испаряемость дизельного топлива $i_{v,i,DM} = 0,68$. Оценить сравнительную испаряемость смешанного топлива на основе рапсового масла и дизельного топлива можно по изменению температуры выкипания 50 % топлива по кривой разгонки [7, с. 233]:

$$\frac{i_{v,i,DT}}{i_{v,i,CM}} = \frac{T_{50,CM}}{T_{50,DT}}, \quad (13)$$

где $i_{v,i,ДТ}$, $i_{v,i,см}$ – динамические испаряемости дизельного и смесового видов топлива; $T_{50,ДТ}$, $T_{50,см}$ – температуры выкипания 50 % дизельного и смесового видов топлива.

Преобразуя выражение (13), получим формулу для расчёта динамической испаряемости смесовых топлив на основе рапсового масла:

$$i_{v,i,см} = \frac{i_{v,i,ДТ} \cdot T_{50,ДТ}}{T_{50,см}}. \quad (14)$$

В [7] показано, что при переходе дизеля для работы с ДТ на топливо с другим фракционным составом условие достижения минимального удельного расхода топлива выражается зависимостью вида

$$i_{v,i} \cdot n \cdot \delta / \delta_o = idem. \quad (15)$$

Однако изменение рабочего цикла дизеля с целью снижения удельного расхода топлива обычно приводит к уменьшению содержания в ОГ сажи (твёрдых частиц) и СО [1, с. 200]. Поэтому выполнение выражения (15) при переходе дизеля на топливо с другим фракционным составом будет также являться условием достижения минимального значения экологических показателей работы дизеля.

Выражение (15) не позволяет достоверно оценивать изменение эксплуатационных показателей работы дизеля по нагрузочным характеристикам. Для того чтобы иметь возможность оценить влияние нагрузки на двигатель при одинаковой частоте вращения, в формулу (15) необходимо ввести показатель значения крутящего момента на валу дизеля $M_{кр}$. С уменьшением нагрузки на двигатель снижается цикловая подача топлива, следовательно, уменьшается среднее давление впрыска форсункой, что приводит к снижению качества распыла топлива и, соответственно, к необходимости повышения интенсивности вихревого движения в цилиндре двига-

теля. В связи с этим предположим, что при переходе дизеля для работы с ДТ на топливо с другим фракционным составом условие достижения минимального удельного расхода топлива и низких значений токсичных компонентов выражается зависимостью вида

$$N = i_{v,i} \cdot n \cdot M_{кр} \cdot \delta / \delta_o = idem. \quad (16)$$

Из формулы (16) следует, что при работе дизеля на смесовых видах топлива на основе РМ для сохранения параметров работы дизеля на высоком уровне при небольших нагрузках и частотах вращения коленчатого вала дизеля можно уменьшить концентрацию РМ в смесовом топливе (динамическая испаряемость топлива $i_{v,i}$ будет снижаться), т. е. облегчить фракционный состав топлива [11].

Выражение (16) отражает только направление изменения концентрации РМ в смесовом топливе, но не численные значения частоты вращения и крутящего момента в зависимости от режима работы двигателя. Окончательный вывод о влиянии смесового топлива на основе рапсового масла на изменение топливной экономичности и экологические показатели дизеля и численные значения концентраций РМ в смесовом топливе на каждом из режимов работы двигателя могут дать экспериментальные исследования.

Дизельный двигатель является основной силовой установкой для сельскохозяйственных и промышленных тракторов. Тракторы в период эксплуатации выполняют работы с различными агрегатами и орудиями, требующими изменения как нагрузочного, так и скоростного режима работы дизеля. Однако для получения наибольшей отдачи от трактора при эксплуатации и снижения затрат стремятся вывести работу его силовой установки на определённый оптимальный режим. Изменение показателей качества топлива повлечёт за собой изменения режима работы дизеля и, со-

ответственно, для сохранения оптимальных параметров работы силовой установки изменение режима работы трактора. В формуле (16) показатели частоты вращения и крутящего момента с учетом известных зависимостей [1, с. 165, 168] заменим на действительную скорость движения трактора и силу тяги на крюке.

Тогда для получения низких удельных показателей расхода топлива и токсичных компонентов при переходе трактора для работы с ДТ на топливо с другим фракционным составом должно

выполняться следующее условие:

$$N = i_{v,i} \cdot \frac{\delta}{\delta_o} \cdot \frac{3 \cdot 10^4}{\pi \cdot \left(1 - \frac{v}{100}\right) \cdot \eta_{mp}} \times V_o \cdot (P_{кр} + P_f) = idem. \quad (17)$$

Рассчитаем показатель N по формуле (17) для работы трактора с разными силами тяги на крюке и скоростями движения для ДТ и смесевых топлив с содержанием РМ 10, 20, 30 и 40 % (табл. 2).

Табл. 2. Данные расчета параметра N на различных режимах работы трактора

V_o , км/ч	$P_{кр}$, кН	Значение параметра $N = i_{v,i} \cdot n \cdot M_{кр} \cdot \delta / \delta_o$				
		100 % ДТ	90 % ДТ + 10 % РМ	80 % ДТ + 20 % РМ	70 % ДТ + 30 % РМ	60 % ДТ + 40 % РМ
6,9	22,5	1679329	1622980	1571411	1494067	1410744
7,2	15,3	1139567	1101329	1066335	1013851	957309
7,5	8,2	685510	662508	641457	609885	575872
5,4	22,5	1260890	1218582	1179862	1121790	1059229
5,6	15,3	852892	824273	798083	758802	716484
5,9	8,2	495660	479028	463807	440979	416386

Лучшее смесеобразование соответствует большему значению параметра N [11]. Для оптимальной работы трактора необходимо, чтобы усилие на крюке и скорость движения были наибольшими, то есть соответствовали номинальному режиму работы дизеля (см. табл. 2). При небольшом изменении скорости движения трактора и значительном снижении нагрузки на крюке показатель N снижается. То же самое наблюдается при неизменном $P_{кр}$ и уменьшении V_o . Так, при работе трактора на СТ, состоящем из 60 % ДТ и 40 % РМ, при $P_{кр} = 8,2$ кН и $V_o = 7,5$ км/ч показатель $N = 575872$. Для поддержания трактором этого режима работы можно увеличить показатель N уменьшив концентрацию РМ в СТ, и при работе на чистом ДТ показатель N примет значение 685510. Поэтому для улучшения

показателей работы трактора на смесевом топливе при изменении нагрузки на крюке и скорости движения необходимо изменять концентрацию РМ в СТ. Значения концентрации РМ в СТ в зависимости от режима работы трактора можно определить, проведя ряд необходимых экспериментов.

Теоретические исследования были подтверждены данными, полученными экспериментальным путем. Авторами были проведены моторные стендовые испытания дизеля Д-245.5С2 по 8-ступенчатому испытательному циклу правил ЕЭК ООН № 96 на ДТ, СТ с концентрацией РМ в ДТ 20 и 40 % и при работе дизеля с системой регулирования состава СТ (табл. 3).

Система регулирования состава СТ на основе РМ позволяет подавать на режимах с повышенной частотой вра-

щения и нагрузкой топливо, состоящее из 60 % ДТ и 40 % РМ; при снижении нагрузки и частоты вращения концен-

трация РМ в смеси снижается, и на холостом режиме и близких к нему в дизель подаётся чистое ДТ.

Табл. 3. Значения параметров работы дизеля Д-245.5С2 и обобщенного критерия оптимальности для исследуемых видов топлива

Тип топлива	$\eta_{\text{еул}}$	Выброс вредных веществ, г/(кВт·ч)		
		e_c	e_{NO_x}	e_{CO}
ДТ	0,365	0,371	6,359	2,626
Смесь 20 % ДТ и 80 % РМ	0,366	0,261	6,287	2,541
Смесь 60 % ДТ и 40 % РМ	0,366	0,234	6,573	2,346
Работа дизеля на СТ переменного состава	0,366	0,229	6,392	2,251

Сравним эффективность снижения выбросов ВВ с ОГ при работе дизеля на чистом ДТ и на СТ постоянного состава (60 % ДТ с 40 % РМ) с работой дизеля, оборудованного системой регулирования состава СТ. Предложенная система регулирования позволяет уменьшить выбросы ВВ. Так, количество сажи в ОГ при регулировании концентрации РМ в СТ снижается на 38,3 % (0,371 г/(кВт·ч) против 0,229 г/(кВт·ч)) по сравнению с работой двигателя на чистом ДТ. При сравнении работы дизеля на смеси, состоящей из 60 % ДТ и 40 % РМ, с работой дизеля, оборудованного системой регулирования, наблюдается снижение выбросов сажи на 2,1 % (0,234 г/(кВт·ч) против 0,229 г/(кВт·ч)). Выбросы оксида углерода снижаются на 14,2 % (2,626 г/(кВт·ч) против 2,251 г/(кВт·ч)) при сравнении работы двигателя на чистом ДТ с устройством регулирования состава СТ и на 4 % (2,346 г/(кВт·ч) против 2,251 г/(кВт·ч)) при сравнении устройства регулирования со смесевым топливом, состоящем из 60 % ДТ и 40 % РМ. Установка устройства на двигатель снижает выбросы оксида азота. Так, по сравнению с работой на СТ, содержащем 40 % РМ, устройство позволяет уменьшить выбросы NO_x на 2,8 % (6,573 г/(кВт·ч) против 6,392 г/(кВт·ч)), однако по сравнению с дизельным про-

цессом выбросы увеличены на 0,5 % (6,359 г/(кВт·ч) против 6,392 г/(кВт·ч)).

Заключение

1. Приводится аналитическая зависимость, связывающая динамическую испаряемость топлива с приведенным вихревым отношением, скоростью движения трактора и силой тяги на крюке, показывающая, что улучшить показатели работы трактора на режимах с низкой нагрузкой можно, уменьшив динамическую испаряемость топлива, т. е. снизив концентрацию рапсового масла в смесевом топливе.

2. Теоретические исследования подтверждены экспериментально. Регулирование состава смесевое топлива позволяет снизить выбросы сажи и оксида углерода на 38,3 и 14,2 % соответственно, выбросы оксидов азота NO_x по сравнению с дизельным процессом увеличить на 0,5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуськов, В. В. Тракторы / В. В. Гуськов. – Минск : Выш. шк., 1977. – Ч. 2. – 384 с.
2. Бондаренко, П. А. Метод выбора параметров и режимов работы колёсного сельскохозяйственного трактора с целью снижения уплотняющего воздействия : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / П. А. Бондаренко. – Липецк, 2005. – 167 с.

3. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет / И. П. Ксеневиц [и др.]. – М. : Машиностроение, 1991. – 544 с.

4. **Карташевич, А. Н.** Загрязнение почв тяжелыми металлами вдоль автомагистралей Республики Беларусь / А. Н. Карташевич, В. А. Белоусов, А. А. Сушнев // Природные ресурсы. – 1998. – № 1. – С. 114–119.

5. **Лиханов, В. А.** Разработка и исследование инженерно-технических средств охраны труда и окружающей среды путем снижения токсичности и дымности отработавших газов трактора класса 6 кН при эксплуатации в животноводческих помещениях : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л. : 1982. – 19 с.

6. **Карташевич, А. Н.** Возобновляемые источники энергии : науч.-практ. пособие / А. Н. Карташевич, В. С. Товстыка. – Горки : БГСХА, 2007. – 264 с.

7. **Камфер, Г. М.** Научные основы эффективного применения топлив различного со-

става в автотракторных дизелях : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.02 / Г. М. Камфер. – М., 2004. – 369 с.

8. **Камфер, Г. М.** Сравнительный анализ процессов испарения в дизелях с различными способами смесеобразования / Г. М. Камфер // Двигателестроение. – 1985. – № 2. – С. 3–7.

9. **Камфер, Г. М.** Комплексный показатель смесеобразования для дизелей с камерой в поршне / Г. М. Камфер // Двигателестроение. – 1986. – № 4. – С. 1–6.

10. **Камфер, Г. М.** Математическое моделирование процесса сгорания спиртосодержащего топлива в дизеле / Г. М. Камфер, С. А. Плотников. – Киров : Авангард, 2005. – 106 с.

11. **Карташевич, А. Н.** Влияние смешанного топлива на эксплуатационные показатели дизеля при различных режимах работы / А. Н. Карташевич, В. С. Товстыка // Вестн. БГСХА. – 2010. – № 4. – С. 138–142.

Белорусская государственная сельскохозяйственная академия
Материал поступил 19.02.2011

**A. N. Kartashevich, V. A. Belousov,
V. S. Tovstyka**
**Change economic and ecological indicators
of work of a tractor depending on a mode
of its work at use mixed fuels**

In the article results of theoretical researches on a substantiation of necessity of change of concentration rapeseed oils in mixed fuel depending on a tractor operating mode are given. The analytical dependence is resulted, allowing to prove the necessity of change of concentration rapeseed oils in mixed fuel depending on an operating mode of a tractor and connecting dynamic vaporability of fuel with the given swirl ratio and with speed of movement of a tractor and force of draught on a hook.

УДК 629.113.004

А. С. Кручек

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ НОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВАМ, НАХОДЯЩИМСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Статья посвящена вопросам совершенствования системы нормирования требований безопасности для автомобильных транспортных средств в эксплуатации. При использовании методологии системного подхода обоснована целесообразность разработки специального нормативного акта, регламентирующего порядок проверки технического состояния транспортных средств при проведении их государственного технического осмотра.

Введение

Как известно, ТС является источником повышенной опасности. Снижение или предотвращение опасного воздействия ТС на человека, созданные им материальные ценности, а также окружающую среду является предметом большого числа исследований и разработок на международной арене. Одним из важнейших аспектов обеспечения безопасности ТС считается нормирование требований к их определенным конструктивным особенностям и эксплуатационным свойствам. Республика Беларусь как страна с достаточно высоким уровнем автомобилизации уделяет проблеме обеспечения безопасности дорожного движения (в состав которого входит вопрос обеспечения безопасности ТС) пристальное внимание. Это подтверждается тем фактом, что основной НПА в данной сфере (Правила дорожного движения) утвержден в республике Указом Президента. Беларусь постоянно находится на передовых позициях в области совершенствования требований безопасности дорожного движения, осуществляется активный нормотворческий процесс по внесению изменений и дополнений в законодательные и другие акты, касающиеся указанной проблемы, такие как Закон «О дорожном движении», Правила дорожного движения, постановления Правительства и причастных министерств, ряд ТНПА.

Поиск нового подхода к обеспечению безопасности ТС, находящихся в эксплуатации, обусловил формирование в 2003 г. последующее развитие качественно новой системы их гостехосмотра. Основной особенностью этой системы стало проведение осмотра на диагностических станциях с использованием современного контрольно-диагностического оборудования силами специально подготовленного персонала.

Накопленный диагностическими станциями и унитарным предприятием «Белтехосмотр», являющимся координатором деятельности по проведению гостехосмотра в Республике Беларусь, опыт показал, что имеющаяся в стране нормативная база требований к конструкции и техническому состоянию ТС нуждается в совершенствовании. Данная статья посвящена анализу нынешнего положения дел в указанном вопросе, формированию подхода к регламентированию требований к техническому состоянию ТС и предложениям по применению этого подхода при разработке нового нормативного документа в сфере гостехосмотра ТС.

Анализ существующих подходов по нормированию требований безопасности транспортных средств и постановка задачи

Нормирование требований, касающихся безопасности ТС, проводится для

различных этапов жизненного цикла ТС, основными из которых являются производство и эксплуатация.

Требования, установленные для производимых ТС, регламентируются как национальными, так и международными техническими нормативными правовыми актами. Такая практика применяется в большинстве стран Европы, России и Беларуси. В качестве единых норм, признаваемых всеми странами, присоединившимися к «Соглашению о принятии единообразных предписаний для колесных транспортных средств, предметов оборудования и частей, которые могут быть установлены и/или использованы на колесных транспортных средствах и об условиях официального признания официальных утверждений, выдаваемых на основе таких предписаний» (Женевское соглашение 1958 г.), выступают в настоящее время Правила, разрабатываемые Комитетом по внутреннему транспорту ЕЭК ООН. Данные Правила полностью или частично становятся основой национальных и межнациональных ТНПА в области регламентации конструктивных требований к ТС. Такими ТНПА в странах Европейского союза являются соответствующие Директивы, в России – государственные стандарты серии 41, в Республике Беларусь – как непосредственно указанные Правила, так и адаптированные к ним государственные стандарты.

Подходы к регламентации требований, предъявляемых к находящимся в эксплуатации ТС, не столь однородны и существенно различаются в отдельных странах. Например, в странах Европейского Союза действует система, в которой основой для национальных норм в указанной сфере служит специальная Директива (в настоящее время Директива 2009/40), устанавливающая минимальный перечень узлов и систем ТС, который должен подвергаться периодическому техническому контролю со стороны уполномоченных для этого ор-

ганизаций, а также указывающая максимальную периодичность выполнения такого контроля. Этот документ предусматривает минимальную регламентацию требований к численным значениям контролируемых показателей (только для тормозных систем и экологических показателей выбросов двигателя) и методам измерений (только для экологических показателей выбросов двигателя). Национальные нормы стран Европейского союза в данной сфере, как правило, не регламентируются на уровне собственных ТНПА, а отражаются в соответствующих комментариях и методических материалах по применению общеевропейских законодательных актов [1–3]. Такой подход позволяет оперативно вносить в указанные материалы изменения и дополнения, обусловленные совершенствованием норм и методов контроля.

В Украине и России требования к ТС (за исключением мототранспортных средств), находящимся в эксплуатации, предъявляются соответствующими государственными стандартами, действующими в области требований безопасности к их техническому состоянию (ДСТУ 3649-97 (Украина) и ГОСТ Р 51709-2001 (Россия)). Данные ТНПА регламентируют не только требования к основным элементам ТС и их комплектации, подлежащим контролю, но и устанавливают методы такого контроля и, если необходимо, предельные значения контролируемых показателей. В соответствии с Правилами дорожного движения этих стран техническое состояние ТС при эксплуатации должно соответствовать требованиям указанных ТНПА.

В Республике Беларусь также имеются государственные стандарты, предъявляющие требования к техническому состоянию ТС по условиям безопасности дорожного движения. В отличие от ближайших соседей, в нашей республике такие ТНПА разработаны как для автомобилей и прицепов к ним

(СТБ 1641-2006), так и для мототранспортных средств (СТБ 1730-2007). Отличие белорусского подхода от подходов, принятых в России и Украине, состоит в том, что согласно действующим Правилам дорожного движения соответствие указанным требованиям необходимо при непосредственном участии ТС в дорожном движении. Такая жесткая регламентация обуславливает необходимость определенного пересмотра подхода к формированию эксплуатационных требований.

Оценивая в общем системы Украины, России и Беларуси по нормированию требований к ТС, находящимся в эксплуатации, можно отметить следующее.

1. Имеется излишняя «зарегламентированность» требований к местам и методам контроля, приводящая к сужению возможности их применения. Описанные в ТНПА места контроля, как правило, не охватывают все разнообразие конструктивных решений ТС. В свою очередь, методы не учитывают возможность использования ряда современных контрольно-диагностических средств. Кроме того, имеются случаи, когда регламентируемые требования практически не реализуемы из-за сложности их контроля (например, контроль требований к проверкам аварийной (запасной) тормозной системы, натяжению ремня гидравлического усилителя руля, суммарной силе света фар головного освещения и т. п.).

2. Форма нормирования в виде государственного стандарта не в полной мере отвечает сферам его применения. Эта форма больше подходит для контроля изделий, поступающих в эксплуатацию после изготовления, капитального ремонта, переоборудования и т. п., когда имеется возможность и основание для всесторонней проверки изделия на соответствие конструкции качеству проведения указанных технических воздействий. Особенностью нормирования требований к ТС, находящимся в экс-

плуатации, по мнению автора, должна быть ограниченная «нестрогая» регламентация, ведущая к запрету на использование ТС по назначению только в определенных случаях.

Переходя к описанию проблем в данной сфере, относящихся непосредственно к условиям Республики Беларусь, следует отметить, что указанные выше недостатки оказывают негативное влияние в первую очередь на систему гостехосмотра, которая, как известно, обеспечивает периодический контроль требований к ТС, находящимся в эксплуатации, по условиям безопасности дорожного движения. Указанный контроль имеет ряд особенностей, требующих применения при нем особого подхода. Эти особенности связаны прежде всего с функционированием правовой системы в государстве и особыми условиями проведения контрольно-диагностических работ.

В рассматриваемой сфере следует отметить следующие проблемы.

Во-первых, формально по результатам гостехосмотра нельзя принять решение о допуске транспортного средства к участию в дорожном движении, поскольку в ходе осмотра проверке подвергаются не все места контроля, предусмотренные соответствующим ТНПА, а методы контроля не всегда в полной мере соответствуют стандартным.

Во-вторых, регламентируемые ТНПА требования не в полной мере соответствуют требованиям, предусмотренным положениями по допуску ТС к участию в дорожном движении действующих Правил дорожного движения, что вызывает разногласия по поводу обоснованности выдаваемых заключений.

В-третьих, в ряде случаев соответствующие стандарты содержат отсылочные нормы на ТНПА, в которых не предусматривается эксплуатационный контроль установленных требований или контроль на эксплуатационную документацию изготовителя, которая в большинстве случаев недоступна.

В-четвертых, предъявляемые соответствующими стандартами требования неоднородны и не всегда терминологически корректны, что не позволяет их однозначно трактовать. (В частности, в одних случаях регламентируется признак работоспособного (исправного) состояния, в других – признак неработоспособного (неисправного) состояния, имеет место путаница в интерпретации самих понятий работоспособного и исправного состояний и т. п.).

В-пятых, ТНПА, действующие в Республике Беларусь, не учитывают факт наличия и эксплуатации на территории республики ТС, не сертифицированных в соответствии с Правилами ЕЭК ООН (предназначенных для реализации на американском, азиатском или африканском рынках).

В-шестых, при гостехосмотре объем требований, предъявляемых к ТС в соответствии с ТНПА, является недостаточным, поскольку реальные выполняемые в ходе указанной процедуры функции выходят за рамки контроля по требованиям безопасности. Это связано с тем, что при гостехосмотре также контролируются вопросы правомерности эксплуатации ТС и некоторые другие, требующие своего отражения в нормативных документах.

В-седьмых, высокий государственный уровень определения порядка проведения гостехосмотра в Республике Беларусь (постановление Совета Министров) не позволяет детализировать некоторые вопросы организации проверки технического состояния ТС.

Наличие указанных проблем дает основание полагать, что необходима разработка отдельного ТНПА, который регламентировал бы требования, предъявляемые к ТС при проведении гостехосмотра, как по условиям безопасности дорожного движения, так и по правомерности эксплуатации и, кроме того, учитывал бы особенности действующей в Республике Беларусь системы допуска ТС к участию в дорожном движении, и

разнообразие эксплуатируемого на ее территории подвижного состава и другие, сопутствующие указанному процессу, факторы.

Разработка концепции решения проблемы нормирования порядка проведения проверки технического состояния ТС при гостехосмотре

В основу разработки концепции решения проблемы положена методология системного подхода, а также использован опыт регламентирования нормативных требований к эксплуатационной безопасности ТС в различных странах мира. Помимо этого, применены результаты исследований д-ра техн. наук С. М. Мороза [4], на основе которых в течение последних лет разрабатываются нормативные требования в данной сфере в России.

В первую очередь в целях определения содержания разрабатываемого документа необходимо определить его место в общей иерархии НПА, действующих в данной сфере. Для того чтобы определить это место, составлена общая схема, в соответствии с которой, по мнению автора, необходимо формировать нормативные требования к техническому состоянию ТС, находящихся в эксплуатации (рис. 1).

Представленная схема наглядно иллюстрирует зависимость содержания НПА от формы регламентации требований к ТС, предусмотренной на каждом уровне упомянутой ранее иерархии.

Эта иерархия основана на стратификации, которой должна быть подчинена государственная система обеспечения безопасности ТС [5], предполагающая разделение причастных органов государственного управления и других организаций на эшелоны согласно уровню выполняемых ими функций. Такая стратификация приведена в [6] и положена в основу представленной схемы нормирования.

Первый эшелон: высшие органы государственного управления (Президент,

Совет Министров), координирующие деятельность подведомственных им органов, ответственных за реализацию отдельных направлений деятельности в области безопасности дорожного движения.

Второй эшелон: органы государственного управления (министерства и приравненные к ним структуры), отвечающие за направления деятельности по

обеспечению безопасности дорожного движения.

Третий эшелон: структурные подразделения органов государственного управления или уполномоченные (аккредитованные) ими организации, организующие исполнение отдельных функций в сфере обеспечения безопасности дорожного движения.

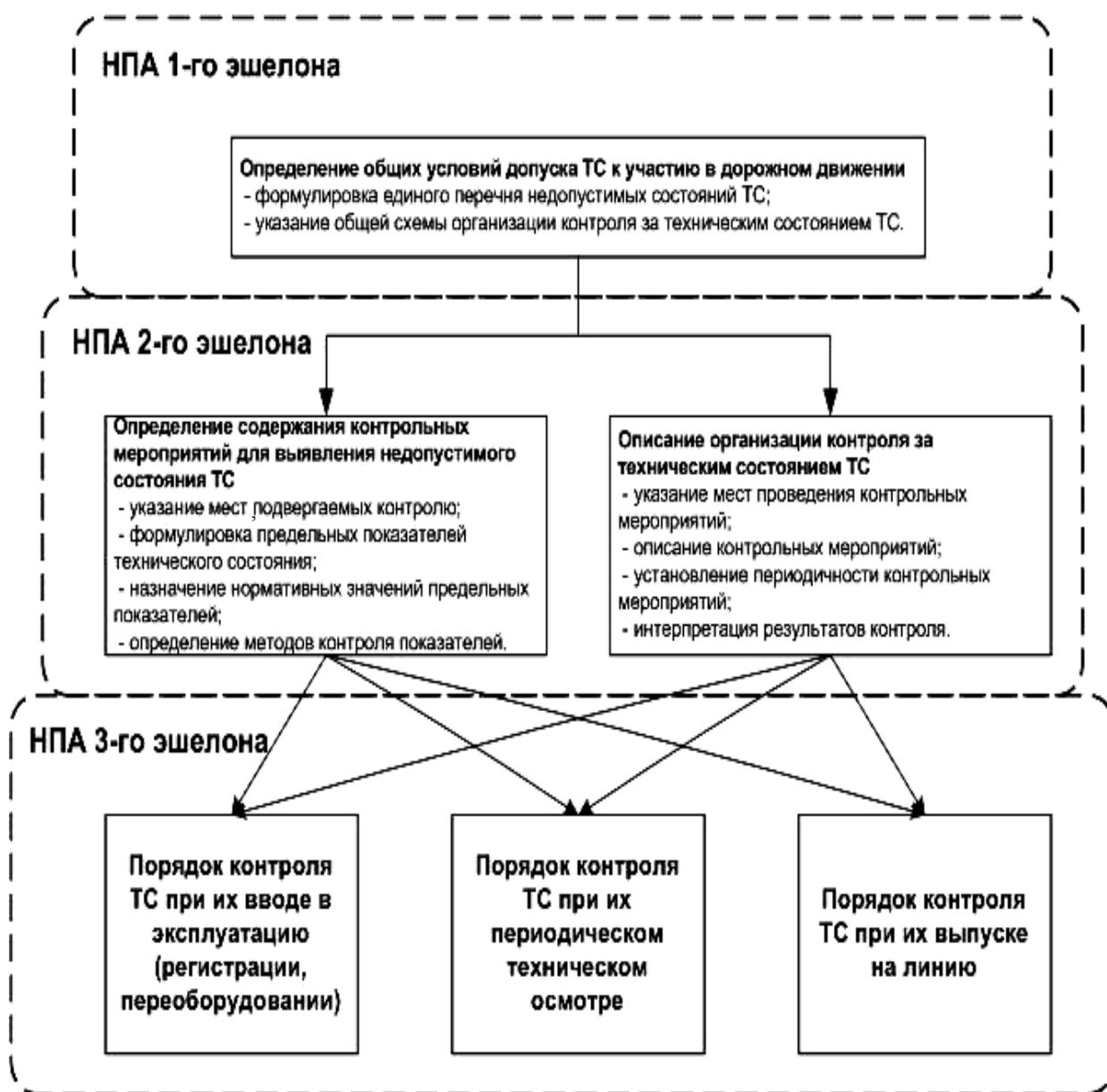


Рис. 1. Иерархическая структура нормирования требований к ТС, находящимся в эксплуатации

Кроме того, разрабатываемый правовой акт целесообразно рассматривать как составную часть одной из подсистем, входящих в состав организационной системы гостехосмотра – подсистемы нормативно-правового обеспечения. Указанной подсистемой применительно к процедуре проверки технического состояния ТС должны решаться следующие задачи:

– описание организации проведения проверки технического состояния ТС и сопутствующих ей процессов;

– нормирование требований к проверяемым показателям технического состояния ТС;

– определение средств и методов контроля нормируемых показателей;

– интерпретация результатов проведения контрольно-диагностических работ;

– определение критериев оценки соответствия технического состояния ТС установленным требованиям.

По мнению автора, наиболее приемлемой формой реализации указанных целей и решения поставленных задач является разработка в сфере гостехосмотра специального технического кодекса установившейся практики, областью нормирования которого будет процесс проверки технического состояния ТС.

Заключение

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Созданная в Республике Беларусь система нормативно-правового обеспечения безопасности ТС, находящихся в эксплуатации, не уступает по уровню своего развития подобным системам, функционирующим в странах Евросоюза, Украине и России.

2. В связи с особенностями функционирования в Республике Беларусь систем гостехосмотра ТС и организации их допуска к участию в дорожном дви-

жении обозначен ряд проблем, затрудняющих применение имеющихся нормативных требований к ТС, находящихся в эксплуатации, и требующих пересмотра подходов к формированию ТНПА в данной сфере.

3. В целях решения обозначенных проблем (в частности, в связи с противоречиями между НПА) необходима разработка ТНПА, определяющего порядок проверки технического состояния ТС в ходе проведения их гостехосмотра. Такая разработка, по мнению автора, органично впишется в иерархическую структуру построения системы нормативно-правового обеспечения безопасности ТС и создаст условия для дальнейшего развития системы гостехосмотра ТС в Республике Беларусь.

Перечень принятых сокращений

Гостехосмотр – государственный технический осмотр.

ЕЭК ООН – Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций.

НПА – нормативный(ые) правовой(ые) акт(ы).

ТС – транспортное(ые) средство(а).

ТНПА – технический(ие) нормативный(ые) правовой(ые) акт(ы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарубежный опыт организации и проведения технических осмотров и регистрации автотранспортных средств. Обзор ТИ-2001. – Минск : Транстехника, 2001.

2. **Braun, H.** §29, AU und wichtiges aus der StVZO / H. Braun. – München : Vogel, 2002. – 384 s.

3. Kelių transporto priemonių valstybinės techninės apžiūros atlikimą reglamentuojantys dokumentai. – Vilnius : Transporto Studijos, 2007. – 100 p.

4. **Мороз, С. М.** Научные основы обеспечения эксплуатационной безопасности автотранспортных средств : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.10 / С. М. Мороз. – М., 2005. – 398 с.

5. **Кручек, А. С.** О совершенствовании системы государственного технического осмотра транспортных средств в Республике Беларусь и их допуска к участию в дорожном движении / А. С. Кручек // Проблемы и перспективы развития Евроазиатских транспортных систем : мате-

риалы Междунар. науч.-практ. конф., 12–13 мая 2009 г. – Челябинск : ЮУрГУ, 2009. – С. 53–56.

6. **Савич, Е. Л.** Применение системного подхода к проблеме обеспечения безопасности транспортных средств / Е. Л. Савич, А. С. Кручек // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. – 2010. – № 8. – С. 71–78.

Республиканское унитарное сервисное
предприятие «Белтехосмотр»
Материал поступил 17.01.2011

A. S. Kroutchek
Development the valuation of safety
requirements for vehicle in use

The article deals with improving the valuation of safety requirements for motor vehicles in use. By using the methodology of a systematic approach it is proved the feasibility of creating a special regulation act, governing the procedure for checking the technical condition of vehicles when carrying out their mandatory periodical technical inspections.

УДК 669.017

Ф. Г. Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, проф.,
Б. Б. Хина, д-р физ.-мат. наук, А. С. Федосенко

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ РЕАГИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ В ШИХТЕ, ПОДВЕРГАЕМОЙ РЕАКЦИОННОМУ МЕХАНИЧЕСКОМУ ЛЕГИРОВАНИЮ

На основе современных представлений о механизме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и с использованием метода термодинамического моделирования решена задача определения максимального содержания реагирующих веществ в подвергаемой обработке в механореакторе шихте, обеспечивающего безопасность реализации процесса реакционного механического легирования.

Введение

Развитие современных отраслей промышленности, включая моторо-, турбино-, авиа-, ракето-, приборостроение, ядерную энергетику, требует создания новых материалов, обладающих, наряду с особыми свойствами, высокой жаропрочностью и способных работать в жестких температурно-силовых условиях. Оптимальный комплекс часто взаимоисключающих свойств может быть достигнут в композиционных материалах, наиболее перспективными из которых являются дисперсно-упрочненные. Структура их представляет собой матрицу из металла или сплава с равномерно распределенными в ней дисперсными частицами термодинамически стабильной упрочняющей фазы, имеющей высокое значение модуля сдвига. Максимальное упрочнение достигается у материалов с основной суб-/микроструктурного типа, обладающей высокоразвитой поверхностью границ зерен и субзерен, закрепленных и стабилизированных наноразмерными частицами упрочняющей фазы [1]. Материалы производит, как правило, порошковая металлургия. Наиболее сложная операция – получение дисперсно-упрочненных порошковых (гранулированных) композиций. Известные способы их изготовления, нашедшие промышленное применение: химическое смешивание, разложение смеси солей, водородное восстановление

в растворах, химическое осаждение из растворов, внутреннее окисление, механическое легирование [2, 3] – являются дорогостоящими и не позволяют реализовать все преимущества дисперсного упрочнения, а химические методы, кроме этого, экологически небезопасны. В связи с этим большой интерес представляет способ, основанный на реакционном механическом легировании, при котором на стадии обработки порошковой смеси в механореакторе и при последующем отжиге в реакционно-способных системах получают развитие механически и термически активируемые фазовые и структурные превращения, включая взаимодействие между компонентами и образование упрочняющих фаз, вызывающие формирование наноструктурной дисперсно-упрочненной гранулированной композиции [2].

Механически легированные композиционные порошки могут применяться как для получения компактных материалов различного функционального назначения, так и для покрытий. В ряде случаев, прежде всего при производстве порошков, для газопламенных покрытий концентрация реагирующих компонентов в шихте, подвергаемой обработке в механореакторе, достаточно высока, а механически активируемые экзотермические реакции протекают с большим тепловыделением. При содер-

жании реагирующих компонентов выше предельного взаимодействия в реакторе может происходить в режиме теплового взрыва или горения по типу СВС – самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [4–7].

Целью работы являлось решение актуальной задачи определения предельного содержания реагирующих веществ, обеспечивающего безопасность реализации процесса реакционного механического легирования.

Методика исследования

Методической основой для решения поставленной задачи служили современные представления о механизме СВС-процессов, выработанные в результате многочисленных экспериментальных [8–17] и теоретических [18–22] исследований, а также универсальный метод термодинамического моделирования. В ряде экспериментальных работ на примере системы «Ti–C» и некоторых других [23, 24] прямым наблюдением в малоразмерных прозрачных реакторах показано, что механическое легирование в режиме ВС носит перколяционный характер, т. е. на определенной стадии процесса происходит воспламенение в малой локальной области (частица или группа частиц), и экзотермическая реакция распространяется почти по всему объему, оставляя после себя конечный продукт; при этом в некоторых областях (куда волна горения не проникает) может оставаться непрореагировавшая шихта. Применительно к СВС подобный перколяционный режим горения был исследован теоретически [18] в порошковой системе при наличии пор и/или инертных частиц. Математическим моделированием установлено, что необходимым условием такого режима горения, даже при достаточно интенсивных тепловых потерях в окружающую среду, является наличие цепочек реакционноспособных частиц (так на-

зываемых перколяционных кластеров), между которыми имеется тепловая связь, т. е. когда теплота, выделяющаяся при горении одной частицы (даже при теплоотводе к соседним инертным частицам и в окружающую среду), способна обеспечить подогрев другой частицы до температуры зажигания T_{ig} ($T_{ig} < T_{ad}$, где T_{ad} – адиабатическая температура СВС в данной системе) [18]. Применительно к реакционному механическому легированию из вышеизложенного следует, что экзотермическая реакция даже в одной частице, вызванная ее разогревом до величины T_{ig} за счет механического соударения с мелкими телами (шарами), способна вызвать воспламенение всей реакционноспособной шихты в объеме механохимического реактора.

Многочисленные экспериментальные исследования для систем «Ti–C» [12], «Ti–C–Ni–Mo» [13, 14], «Mo–Si» [15], «Ti–C–M» (M = Ni, Co, Cr) [11], «Ni–Al» [16, 17] и др. показали, что СВС-процесс начинается, когда исходная шихта нагревается до температуры плавления более легкоплавкого компонента или температуры эвтектики системы T_{eu} [8–15], т. е. при $T_{ig} = T_{eu}$. Это обусловлено тем, что основным механизмом фазо- и структурообразования при СВС является не твердофазная диффузия, а растворение более тугоплавкого реагента в локальном расплаве и кристаллизация из него зерен тугоплавкого продукта [18–23]. Причем процесс часто имеет неравновесный характер: растворение одного реагента в расплаве другого (например, C(тв.) в Ti(ж.) или Ni(тв.) в расплаве алюминия) протекает без тонкой промежуточной прослойки равновесной твердой фазы (TiC или NiAl соответственно) [19–22]. Это связано с малой скоростью диффузии в тугоплавких фазах – продуктах синтеза. Например, расчет для СВС в системе «Ti–C» показал, что для экспериментально известных коэффициентов диффузии в фазе TiC толщина равновесной прослойки карбида между

твердой частицей углерода и расплавом титана должна быть меньше периода решетки [19, 22].

Таким образом, в качестве критерия для начала взаимодействия в режиме СВС в объеме механохимического реактора при реакционном механическом легировании следует принять такой состав реакционноспособной шихты, для которого адиабатическая температура реакции образования продукта T_{ad} достигает величины легкоплавкой эвтектики T_{eu} на основе одного из реагентов. Следовательно, для определения безопасных режимов реакционного механического легирования необходимо оценить адиабатическую температуру взаимодействия в многокомпонентной шихте при протекании в ней химических реакций и выбрать область составов, для которых $T_{ad} \leq T_{eu}$. Для таких расчетов целесообразно использовать метод термодинамического моделирования [25, 26].

Термодинамический расчет адиа-

батической температуры СВС для одной реакции основан на простом допущении [27]: реакция протекает полностью (со степенью превращения 100 %) в адиабатических условиях, т. е. теплота реакции при начальной температуре T_0 ($T_0 \geq 298$ K) расходуется на разогрев до T_{ad} и на возможное плавление продуктов. Расчет сводится к определению величины T_{ad} из нелинейного уравнения баланса энтальпии. В данном случае, как и в вышеприведенных расчетах равновесного состояния систем конструкционных материалов, использована универсальная программа АСТРА-4 [28, 29].

Системы для расчета, приведенные в табл. 1, являются основой для создания большой группы порошков дисперсно-упрочненных железных и никелевых сплавов, упрочненных Al_2O_3 или TiC, ряд составов которых выходит за рамки композиций, исследуемых в данной работе.

Табл. 1. Исходные составы смесей для реакционного механического легирования и качественный равновесный фазовый состав при адиабатической температуре взаимодействия T_{ad}

Исходный состав, % масс.	Равновесный состав при T_{ad}
<i>Системы на основе железа</i>	
$(1-x)Fe + x(74,745\% Fe_2O_3 + 25,255\% Al \rightarrow 52,28\% Fe + 47,72\% Al_2O_3)$	Fe, Al_2O_3 (упрочняющая фаза)
$(1-x)Fe + x(79,95\% Ti + 20,05\% C \rightarrow 100\% TiC)$	Fe, TiC (упрочняющая фаза)
$(1-x)[(72 - 52,28x / (1-x))\% Fe + 10\% Ni + 18\% Cr] + x(74,745\% Fe_2O_3 + 25,255\% Al \rightarrow 52,28\% Fe + 47,72\% Al_2O_3)$	Fe-Ni-Cr (твердый раствор), Al_2O_3 (упрочняющая фаза)
$(1-x)(72\% Fe + 10\% Ni + 18\% Cr) + x(79,95\% Ti + 20,05\% C \rightarrow 100\% TiC)$	Fe-Ni-Cr (твердый раствор), TiC (упрочняющая фаза)
<i>Системы на основе никеля</i>	
$(1-x)Ni + x(75,4\% Ni_2O_3 + 24,6\% Al \rightarrow 53,52\% Ni + 46,48\% Al_2O_3)$	Ni, Al_2O_3 (упрочняющая фаза)
$(1-x)Ni + x(79,95\% Ti + 20,05\% C \rightarrow 100\% TiC)$	Ni, TiC (упрочняющая фаза)
$(1-x)[(80 - 53,52x / (1-x))\% Ni + 20\% Cr] + x(75,4\% Ni_2O_3 + 24,6\% Al \rightarrow 53,52\% Ni + 46,48\% Al_2O_3)$	Ni-Cr (твердый раствор), Al_2O_3 (упрочняющая фаза)
$(1-x)(80\% Ni + 20\% Cr) + x(79,95\% Ti + 20,05\% C \rightarrow 100\% TiC)$	Ni-Cr (твердый раствор), TiC (упрочняющая фаза)
Примечание – Подчеркнут металл-основа твердого раствора	

Поскольку целью термодинамического моделирования было определение исходного состава шихты (параметр x в табл. 1), при котором становится возможным взаимодействие в режиме СВС, для анализа использовали бинарные и тройные равновесные диаграммы состояния для данных систем [30–34]. Полученные в результате термодинамического моделирования значения T_{ad} сравнивали с величиной T_{eu} на диаграммах.

Для бинарного твердого раствора хрома в никеле (составы 7 и 8) учитывали избыточную энергию смешения. Выражения, аппроксимирующие избыточные парциальные энтальпии смешения i -го компонента $\Delta h_i^{(ex)}$, приводили к виду, соответствующему модели квази-

субрегулярного раствора (с учетом зависимости $\Delta h_i^{(ex)}$ от температуры и концентрации):

$$\Delta h_i^{(ex)} = (1 - x_i)^2 [a + bT + (c + dT)x_i],$$

где x_i – доля i -го элемента в растворе (для бинарного раствора $i = 1, 2$).

Значения коэффициентов a , b , c , и d для γ -твердого раствора на основе никеля определяли по данным [35]. Значения параметров, использованных при термодинамическом моделировании, приведены в табл. 2. Расчеты показали, что учет образования твердого раствора вносит небольшую поправку в величину T_{ad} по сравнению с ситуацией, когда этот фактор не принимали во внимание.

Табл. 2. Избыточная энтальпия смешения бинарного твердого раствора на основе никеля, использованная в расчетах [35]

Система	Фаза	Интервал температуры, К	Элемент	Выражение для Δh_i^{ex} , Дж/(г·атом)
Ni–Cr	γ (ГЦК)	1000...1728	Ni	$(1 - x_{Ni})^2 [36349,96 - 35,648T - (123085,46 - 76,157T)x_{Ni}]$
			Cr	$(1 - x_{Cr})^2 [-25192,74 + 2,429T + (123085,46 - 76,157T)x_{Cr}]$
Примечание – x_i – атомная доля i -го компонента твердого раствора				

В составах 3 и 4 при реакционном механическом легировании формируется твердый раствор хрома и никеля в γ -Fe. Поскольку программа АСТРА-4 не предусматривает учет трехкомпонентного раствора, при термодинамическом моделировании задавали идеальный раствор на основе железа, т. е. $\Delta h_i^{(ex)} = 0$.

Результаты расчетов и их обсуждение

Составы на основе железа

Состав 1. Результаты расчета адиабатической температуры взаимодействия показаны на рис. 1. Нелинейный ход зависимости $T_{ad}(x)$ обусловлен сложным характером зависимости теплоемкости железа (основы композиции) от температуры. Взаимодействие

в данной системе в режиме СВС, т. е. протекание термитной реакции $Fe_2O_3 + Al \rightarrow Fe + Al_2O_3$ начинается после образования легкоплавкой эвтектики Al–FeAl₃, температура которой $T_{eu} = 928$ К близка к точке плавления алюминия. В композиционных (слоистых) частицах исходного состава всегда будет присутствовать контакт Fe–Al. При локальном нагреве в момент скользящего удара на границе Fe/Al возможно достижение температуры $T_{eu}(Al\text{–}FeAl_3) = 928$ К и образование эвтектического расплава системы «Fe–Al» по механизму контактного плавления. В контакте с возникшей прослойкой расплава может оказаться частица или прослойка твердого Fe₂O₃; как известно, композиционные частицы, сформировавшиеся вследствие разрушения и хо-

лодной сварки на начальных стадиях механического легирования, состоят из переплетающихся (и необязательно плоских) прослоек всех исходных веществ. Это приведет к развитию быстрого взаимодействия по реакции

$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{тв.}) + \text{Al}(\text{ж.}) \rightarrow \text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$ и локальному разогреву, который может привести к распространению экзотермической реакции по всему объему реактора.

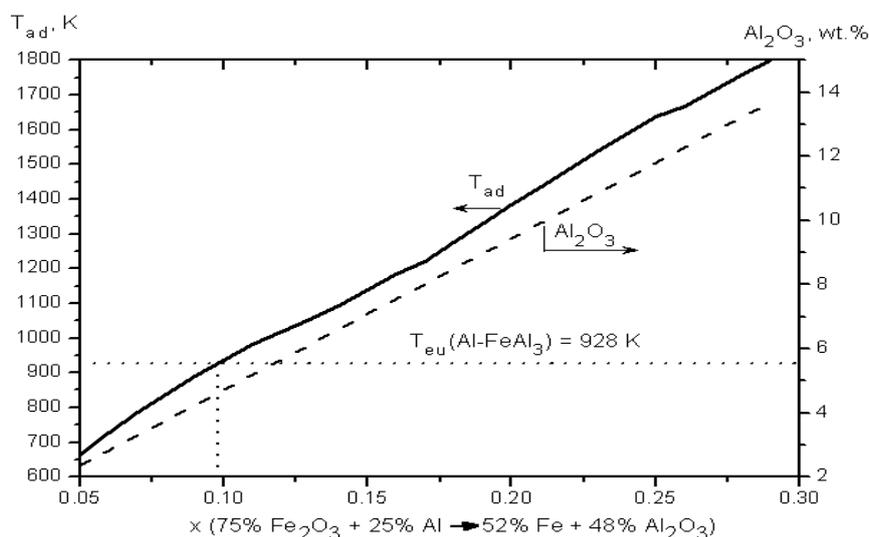


Рис. 1. Результаты термодинамического моделирования экзотермического взаимодействия в составе 1 на основе Fe: адиабатическая температура и доля упрочняющей фазы (Al_2O_3)

Поэтому величина x (содержание стехиометрической смеси $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ в шихте) для возможного начала взаимодействия в режиме СВС при реакционном механическом легировании соответствует достижению условия $T_{\text{ad}} = T_{\text{eu}}(\text{Al-FeAl}_3) = 928 \text{ K}$, и это значение составляет $x \approx 10 \%$ масс. (см. рис. 1). По данным термодинамического моделирования, термитная реакция протекает почти полностью. Основной упрочняющей фазой в конечном продукте является оксид алюминия, концентрация которого при указанном предельно допустимом значении x составляет $\approx 4 \%$ масс.

Состав 2. В данном составе тепловой эффект реакции образования карбида титана по реакции $\text{Ti} + \text{C} \rightarrow \text{TiC}$ ниже, чем экзотермический эффект термитной реакции в смеси 1. Указанная реакция протекает практически полностью. В системе «Fe–Ti» наиболее легкоплавкой эвтектикой является Ti–FeTi с температурой плавления

$T_{\text{eu}}(\text{Ti-FeTi}) = 1358 \text{ K}$. В композиционной частице имеется контакт железа с титаном, и при нагреве в момент скользящего удара локальная температура может достичь величины T_{eu} . Образование локального эвтектического расплава (по механизму контактного эвтектического плавления) приведет к растворению в нем других реагентов (в данном случае углерода), оказавшихся в контакте с расплавленной областью, и развитию экзотермической реакции формирования карбида титана по механизму растворения–кристаллизации. Поэтому содержание стехиометрической смеси Ti + C в шихте, соответствующее условию $T_{\text{ad}} = T_{\text{eu}}(\text{Ti-FeTi})$, следует считать пределом, при достижении которого становится возможным взаимодействие в режиме СВС. Как видно из рис. 2, предельное значение составляет $x \approx 25 \%$ масс., при этом доля упрочняющей фазы (карбида титана) в получаемой композиции достигает $\approx 25 \%$ масс.

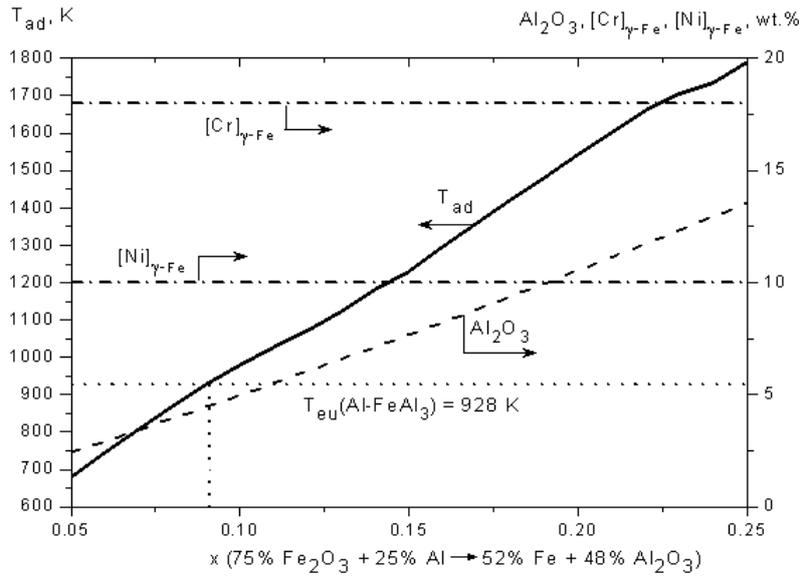


Рис. 2. Результаты термодинамического моделирования экзотермического взаимодействия в составе 2 на основе Fe: адиабатическая температура и доля упрочняющей фазы (TiC)

Состав 3. В данной композиции, как и в составе 1, экзотермическая реакция $Fe_2O_3 + Al \rightarrow Fe + Al_2O_3$ (горение железо-алюминиевого термита, или реакция Гольдшмита) начинается после образования легкоплавкой эвтектики Al-FeAl₃. Поэтому предельным содержанием стехиометрической смеси $Fe_2O_3 + Al$ в исходной композиции является величина x , при которой адиабатическая температура взаимодействия

равна $T_{eu}(Al-FeAl_3) = 928$ К. Это значение составляет $x \approx 9$ % масс. (рис. 3), а содержание упрочняющей фазы (Al_2O_3) при этом – около 4,5 % масс. По данным термодинамического моделирования, в равновесном состоянии при адиабатической температуре исходные хром и никель растворяются в аустените, образуя матрицу нержавеющей стали типа 00X18H10.

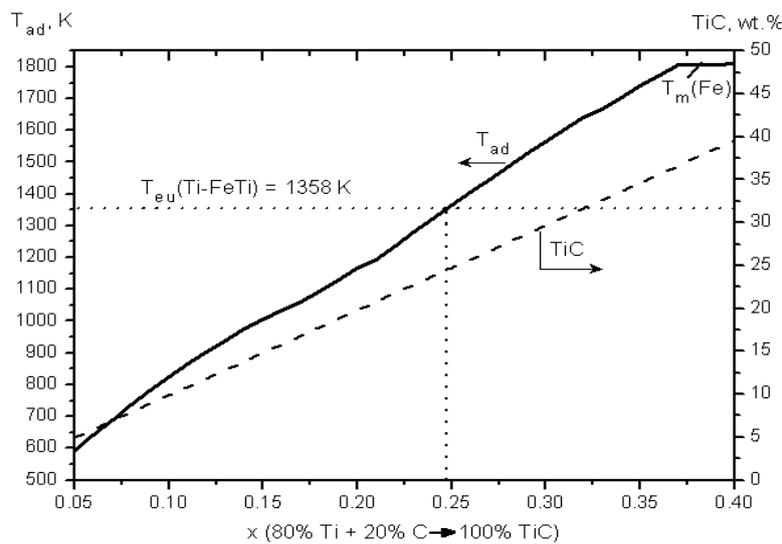


Рис. 3. Результаты термодинамического моделирования экзотермического взаимодействия в составе 3 на основе Fe: адиабатическая температура, доля упрочняющей фазы (Al_2O_3) и содержание никеля в γ -твердом растворе на основе железа

Состав 4. Как и в составе 2, основное тепловыделение в нем обеспечивается за счет реакции образования карбида титана $Ti + C \rightarrow TiC$, которая протекает по механизму растворения углерода в расплаве на основе титана и кристаллизации зерен TiC . Поскольку в исходной шихте имеется достаточно высокое содержание никеля и титана, то в местах контакта $Ni-Ti$ при локальном нагреве во время соударения возможно контактное плавление, если температура в зоне такого контакта достигнет точки эвтектики $Ti-Ni_2Ti$: $T_{eu}(Ti-Ni_2Ti) = 1215$ К.

Образование расплава в локальной области приведет к растворению в нем соседних частиц/слоев реагентов и, в частности, углерода, что, в свою очередь, приведет к началу экзотермиче-

ской реакции образования карбида титана в локальной области и затем к распространению СВС-процесса по шихте внутри реактора. Следовательно, состав шихты x (содержание экзотермической добавки $Ti + C$), при котором адиабатическая температура взаимодействия в данной системе достигнет величины $T_{eu}(Ti-Ni_2Ti) = 1215$ К, можно считать критерием для начала СВС. По данным расчетов (рис. 4), это значение равно $x \approx 20$ % масс. Во всей области составов термодинамически выгодно образование γ -твердого раствора хрома и никеля в железе, т. е. состав матрицы будет соответствовать нержавеющей стали типа X18H10.

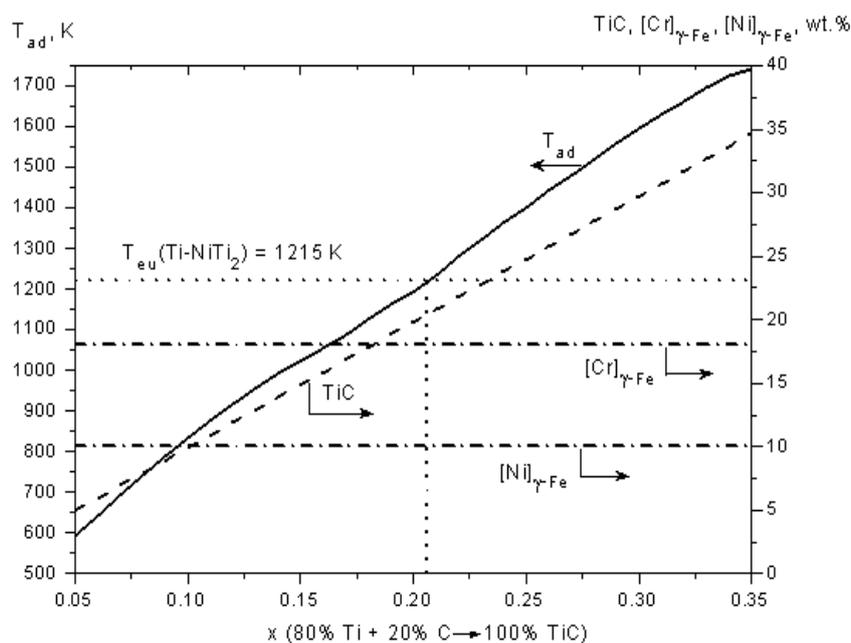


Рис. 4. Результаты термодинамического моделирования экзотермического взаимодействия в составе 4 на основе Fe: адиабатическая температура, доля упрочняющей фазы (TiC) и содержание хрома и никеля в γ -твердом растворе на основе железа

Составы на основе никеля

Состав 5. Для локального инициирования экзотермической реакции $Ni_2O_3 + Al \rightarrow Ni + Al_2O_3$ необходимо образование локального расплава на основе алюминия. В системе « $Ni-Al$ » имеет-

ся легкоплавкая эвтектика $Al-NiAl_3$, температура которой $T_{eu}(Al-NiAl_3) = 913$ К близка к точке плавления чистого алюминия $T_m(Al) = 933$ К. При соударении в контакте $Al-Ni$ возможен кратковременный разогрев до указанной тем-

пературы и образование участка расплава по механизму контактного плавления. Поскольку частицы или прослойки исходных реагентов после начала МЛ расположены хаотично, всегда будет присутствовать контакт исходного Ni_2O_3 с образовавшимся локальным расплавом, что может привести к началу локальной экзотермической реакции и далее к ее распространению по объему шихты. Таким образом, за критерии начала СВС в данной системе следует принять такой состав x (содержание реакционноспособной добавки $75,4\% \text{Ni}_2\text{O}_3 + 24,6\% \text{Al}$), при котором выполняется условие $T_{\text{ad}} = T_{\text{eu}}(\text{Al-NiAl}_3) = 913 \text{ K}$. По данным термодинамического моделирования (рис. 5), это значение составляет $x \approx 6,5\% \text{ масс.}$, а соответствующая доля упрочняющей фазы (Al_2O_3) в продукте синтеза – около $3\% \text{ масс.}$

Состав 6. В данной композиции после начальной стадии механического легирования всегда будут присутствовать контакты Ni–Ti. Поэтому при соударении возможно образование эвтектического расплава, если локальный разогрев достигнет величины

$T_{\text{eu}}(\text{Ti-Ni}_2\text{Ti}) = 1215 \text{ K}$. Поэтому (как и в составе 4 на основе железа) концентрация экзотермической добавки Ti + C (величина x), при которой будет достигнуто условие $T_{\text{ad}} = T_{\text{eu}}(\text{Ti-Ni}_2\text{Ti})$, можно принять в качестве критерия для развития СВС-процесса в шихте в процессе реакционного механического легирования. По данным термодинамического моделирования (рис. 6), эта величина составляет $x \approx 17,5\% \text{ масс.}$, а соответствующая доля упрочняющей фазы (TiC) в продукте синтеза – также около $17,5\% \text{ масс.}$

Состав 7. В данной композиции, как и в системе 5, возникновение режима СВС возможно для состава, при котором выполняется условие $T_{\text{ad}} = T_{\text{eu}}(\text{Al-NiAl}_3) = 913 \text{ K}$. Согласно результатам термодинамического моделирования, критическое значение равно $x \approx 6\% \text{ масс.}$, а соответствующая доля упрочняющих включений Al_2O_3 в продукте – около $2,5\% \text{ масс.}$ (рис. 7). Весь исходный хром может уйти в твердый раствор на основе никеля, т. е. состав матрицы будет соответствовать нихрому X20H80.

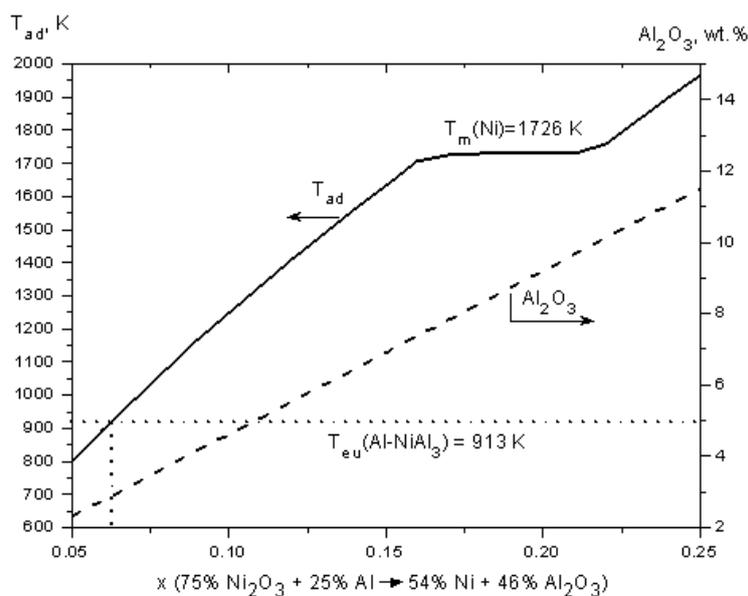


Рис. 5. Результаты термодинамического моделирования экзотермического взаимодействия в составе 5 на основе Ni: адiabатическая температура и доля упрочняющей фазы (Al_2O_3)

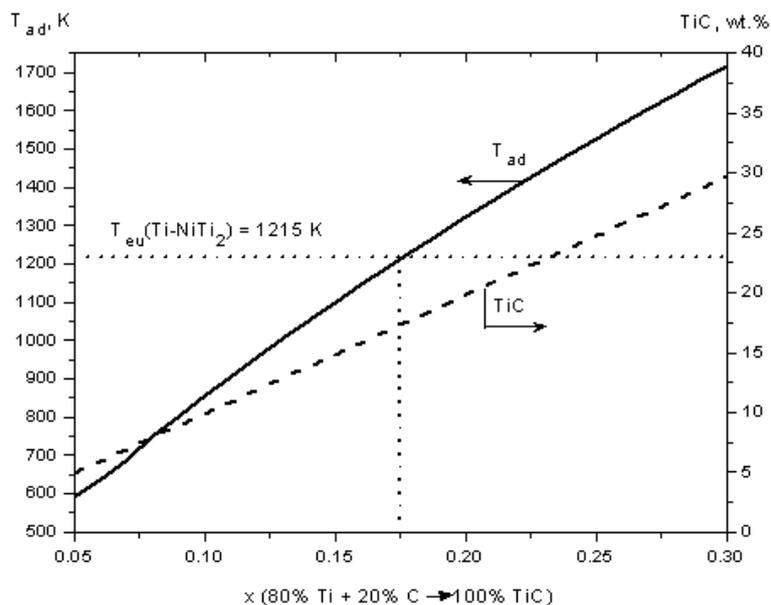


Рис. 6. Результаты термодинамического моделирования экзотермического взаимодействия в составе 6 на основе Ni: адиабатическая температура и доля упрочняющей фазы (TiC)

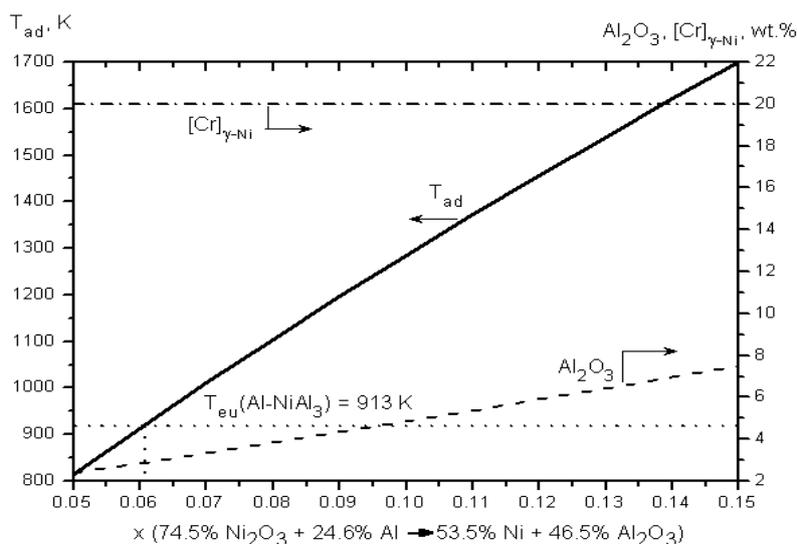


Рис. 7. Результаты термодинамического моделирования экзотермического взаимодействия в составе 7 на основе Ni: адиабатическая температура, доля упрочняющей фазы (Al₂O₃) и содержание хрома в твердом растворе на основе никеля

Состав 8. Как и в шихте 6, в качестве критерия для возникновения СВС-процесса в объеме реактора для реакционного механического легирования следует принять такой состав шихты, при котором $T_{ad} = T_{eu}(Ti-Ni_2Ti) = 1215$ К. По данным термодинамического моделирования (рис. 8), предельная доля добавки

Ti+C составляет $x \approx 17,5$ % масс. и соответствующая концентрация упрочняющей фазы (зерен TiC) также около 17,5 % масс. Термодинамически выгодно образование твердого раствора хрома в никеле, т. е. равновесный состав матрицы будет соответствовать нихрому X20H80.

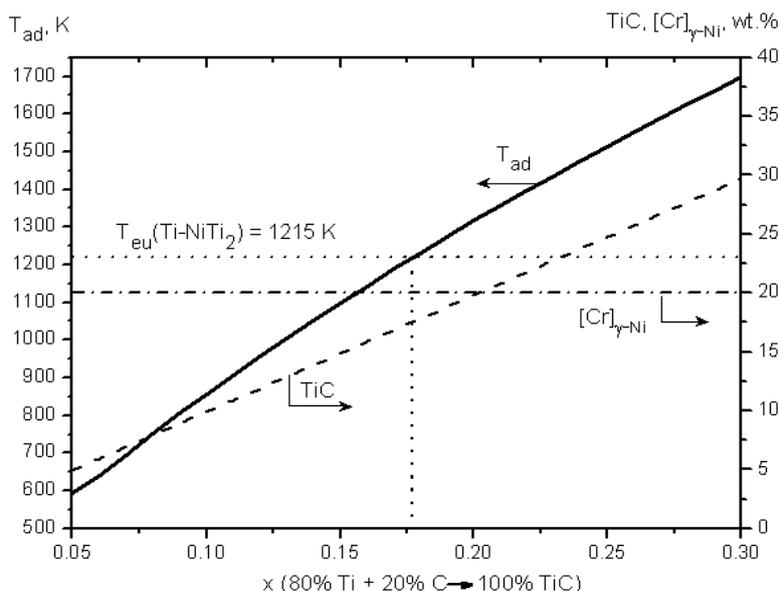


Рис. 8. Результаты термодинамического моделирования экзотермического взаимодействия в составе 8 на основе Ni: адиабатическая температура, доля упрочняющей фазы (TiC) и содержание хрома в твердом растворе на основе никеля

Как показано выше, при наличии пор и/или инертных частиц в обрабатываемой шихте необходимым условием реализации механического легирования в режиме СВС является наличие цепочек реакционноспособных частиц, между которыми имеется тепловая связь, т. е. когда теплота, выделяющаяся при горении одной частицы, способна обеспечить подогрев другой частицы до температуры зажигания T_{ig} ($T_{ig} < T_{ad}$, где T_{ad} – адиабатическая температура СВС в данной системе) [18]. С учетом того, что реакционное механическое легирование в металлических системах получает развитие при степени заполнения камеры 70...80 % и объемном отношении рабочих тел и шихты не менее 6, причем большая часть шихты может считаться «инертной» добавкой, выполнение этого условия при производстве конструкционных материалов маловероятно. Многократные экспериментальные исследования авторов однозначно показали, что концентрация реагирующих элементов в системах с образованием Al_2O_3 и TiC без риска возникнове-

ния СВС-процесса может быть увеличена по отношению к расчетной минимум в 5 и 3 раза соответственно [1]. Вышеприведенные результаты расчета справедливы для сформировавшейся композиционной частицы или группы частиц, находящихся в контакте в момент ударного воздействия на них рабочих тел.

Заключение

Проведенные расчеты показали, что в многокомпонентных железных и никелевых системах механически активируемое взаимодействие по механизму СВС теоретически возможно при содержании реагирующих веществ – металлов, имеющих высокое сродство к кислороду (Al) или углероду (Ti), с одной стороны, и кислородосодержащих соединений (Fe_2O_3 , Ni_2O_3) или углерода, с другой, обеспечивающем образование Al_2O_3 в железных сплавах более 4 % масс., в никелевых – более 3 % масс., TiC – 25 и 17,5 % масс. соответственно. Результаты расчета справедливы для сформировавшейся композиционной

частицы или группы частиц, находящихся в контакте в момент ударного воздействия на них рабочих тел.

Согласно экспериментальным исследованиям, концентрация реагирующих компонентов в системах с образованием Al_2O_3 и TiC без риска возникновения СВС-процесса может быть увеличена по отношению к расчетной минимум в 5 и 3 раза соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
2. Композиционные материалы : справочник / Под ред. Д. М. Карпиноса. – Киев: Наукова думка, 1985. – 592 с.
3. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справочник / И. М. Федорченко [и др.] ; отв. ред. И. М. Федорченко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 624 с.
4. **Schaffer, G. B.** Combustion synthesis by mechanical alloying / G. B. Schaffer, P. G. McCormick // Scripta Metallurgica. – 1989. – Vol. 23. – P. 835–838.
5. **Zhang, D. L.** Microstructural evolution during combustion reaction between CuO and Al induced by high energy ball milling / D. L. Zhang, J. J. Richmond // Journal of Materials Science. – 1999. – Vol. 34, № 4. – P. 701–706.
6. **Kwon, Young-Soon.** Ball temperatures during mechanical alloying in planetary mills / Young-Soon Kwon, K. B. Gerasimov, Sok-Keel Yoon // Journal of Alloys and Compounds. – 2002. – Vol. 346, № 1–2. – P. 276–281.
7. Effect of material characteristics on the ignition of the combustion reactions induced by ball milling / Ma Mingliang [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – Vol. 116. – P. 124–127.
8. **Мержанов, А. Г.** Научные основы, достижения и перспективы развития процессов твердопламенного горения / А. Г. Мержанов // Изв. Академии наук. Серия химическая. – 1997. – № 1. – С. 8–32.
9. **Munir, Z. A.** Self-propagating exothermic reactions: the synthesis of high-temperature materials by combustion / Z. A. Munir, U. Anselmi-Tamburini // Materials Science Reports. – 1989. – Vol. 3, № 7/8. – P. 277–365.
10. **Итин, В. И.** Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений / В. И. Итин, Ю. С. Найбороденко. – Томск : Томск. гос. ун-т, 1989. – 214 с.
11. **Khusid, B. M.** Limits of the self-propagating high-temperature synthesis wave propagation in eutectic composite materials / B. M. Khusid, B. V. Khina, S. V. Demidkov // Journal of Materials Science. – 1994. – Vol. 29, № 8. – P. 2187–2191.
12. Макрокинетика структурных превращений при безгазовом горении смесей порошков титана и углерода / А. Г. Мержанов [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т. 26, № 1. – С. 104–119.
13. Combustion synthesis in the Ti-C-Ni-Mo system. Pt. I. Micromechanisms / J. C. LaSalvia [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1995. – Vol. 26, № 11. – P. 3001–3009.
14. **LaSalvia, J. C.** Combustion synthesis in the Ti-C-Ni-Mo system. Pt. II. Analysis / J. C. LaSalvia, M. A. Meyers // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1995. – Vol. 26, № 11. – P. 3011–3019.
15. On the formation of $MoSi_2$ by self-propagating high-temperature synthesis / J. Sung-Won [et al.] // Acta Materialia. – 1996. – Vol. 44, № 11. – P. 4317–4326.
16. **Quncheng, Fan.** Dissolution-precipitation mechanism of self-propagating high-temperature synthesis of mononickel aluminide / Fan Quncheng, Chai Huifen, Jin Zhihao // Intermetallics. – 2001. – Vol. 9, № 7. – P. 609–619.
17. **Zhu, P.** Reaction mechanism of combustion synthesis of NiAl / P. Zhu, J. C. M. Li, C. T. Liu // Materials Science and Engineering A. – 2002. – Vol. 329–331, № 1–2. – P. 57–68.
18. Percolation combustion : is it possible in SHS? / O. S. Rabinovich [et al.] // International Journal of SHS. – 2002. – Vol. 11, № 3. – P. 257–270.
19. **Khina, B. B.** Limits of applicability of the «diffusion-controlled product growth» kinetic approach to modeling SHS / B. B. Khina, B. Formanek, I. Solpan // Physica B : Physics of Condensed Matter. – 2005. – Vol. 355, № 1–4. – P. 14–31.
20. **Khina, B. B.** Modeling nonisothermal interaction kinetics in the condensed state : a diagram of phase formation mechanisms for the Ni-Al system / B. B. Khina // Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 101, № 6. – P. 47–55.
21. **Khina, B. B.** Modeling heterogeneous interaction during SHS in the Ni-Al system : a phase-formation-mechanism map / B. B. Khina, B. Formanek // International Journal of SHS. – 2007. – Vol. 16, № 2. – P. 51–61.
22. **Khina, B. B.** Interaction kinetics in

SHS: is the quasi-equilibrium solid-state diffusion model valid? / B. B. Khina // International Journal of SHS. – 2005. – Vol. 14, № 1. – P. 21–32.

23. A direct view of the self-combustion behaviour of TiC system under milling / C. Deidda [et al.] // Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials. – 2003. – Vol. 15–16. – P. 215–220.

24. The self-combustion of structurally co-deformed powder mixtures: a direct view of the process / M. Monagheddu [et al.] // Journal of Physics D : Applied Physics. – 2003. – Vol. 36, № 7. – P. 1917–1922.

25. **Mason, P.** Modeling thermodynamic processes / P. Mason, M. Mignanelli // Advanced Materials and Processes. – 1998. – Vol. 153, № 4. – P. 21–24.

26. **Gallagher, R.** Computer calculation of multicomponent phase equilibria / R. Gallagher, H.-D. Nussler, P. J. Spencer // Physica B. – 1981. – Vol. 103 B, № 1. – P. 8–20.

27. **Новиков, Н. П.** Термодинамический анализ реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Н. П. Новиков, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов ; под ред. А. Г. Мержанова // Проблемы горения в химической технологии и металлургии. – Черноголовка : ОИХФ, 1975. – С. 174–188.

28. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г. Б. Синярев [и др.]. – М. : Наука, 1982. – 274 с.

29. **Ватолин, Н. А.** Термодинамическое моделирование металлургических процессов / Н. А. Ватолин, Г. К. Моисеев, Б. Г. Трусов. – М. : Металлургия, 1994. – 312 с. : ил.

30. **Хансен, М.** Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. – М. : Металлургия, 1962. – Т. 1–2.

31. **Эллиот, Р. П.** Структуры двойных сплавов / Р. П. Эллиот. – М. : Металлургия, 1968. – Т. 1–2.

32. **Шанк, Ф. А.** Структуры двойных сплавов / Ф. А. Шанк. – М. : Металлургия, 1973. – 223 с.

33. **Кубашевски, О.** Диаграммы состояния двойных систем на основе железа : справочник : пер. с англ. / О. Кубашевски. – М. : Металлургия, 1985. – 398 с.

34. Binary Alloy Phase Diagrams / Т. В. Massalski [et al.] // Materials Park. – 1990. – 1824 p.

35. **Chuang, Y. Y.** A thermodynamic analysis of the nickel-chromium system / Y. Y. Chuang, Y. A. Chang // Zeitschrift für Metallkunde. – 1986. – Vol. 77, № 7. – P. 460–466.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 23.02.2011

**F. G. Lovshenko, G. F. Lovshenko,
B. B. Khina, A. S. Fedosenko**
**Calculation of the maximum concentration
of reacting components in the charge under
reactionary mechanical alloying**

On the basis of modern knowledge about the mechanism of self-extending high-temperature synthesis and with the use of the thermodynamic modelling method the problem of detection of maximum reacting substance content in the charge under processing in the mechanoreactor, providing safety of the reactionary mechanical alloying process has been solved.

УДК 620.179.14

**В. А. Новиков, д-р техн. наук, проф., Г. И. Скрыбина, канд. техн. наук, доц.,
А. В. Шилов, А. В. Кушнер**

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МАГНИТОГРАФИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Проведен обзор новых теоретических и экспериментальных исследований в области магнитографической дефектоскопии, выполненных авторами. Описаны результаты исследований с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса, осуществляющего яркостную индикацию сигналов от дефектов с записью полей дефектов на визуализирующую магнитные поля пленку. Указаны перспективные направления применения магнитографической дефектоскопии в машиностроении.

В машиностроении существует большое количество объектов из ферромагнитных материалов, которые необходимо контролировать на наличие поверхностных и подповерхностных дефектов: коленчатые, карданные, кулачковые валы, оси, шпильки, зубчатые колеса, подшипники, корпусные детали, рессоры, колесные пары вагонов, сцепки, хомуты тяговые, буровое оборудование и др. Такие объекты иногда покрыты слоем краски или в процессе эксплуатации подвергаются коррозии. Весьма перспективным для их дефектоскопии является магнитографический метод контроля (МГК). Он характеризуется высокой производительностью и экономичностью, не требует предварительной зачистки поверхности контролируемого изделия, однако существующие устройства для реализации метода характеризуются большими весом и габаритами, необходимостью изготовления дополнительных полюсных наконечников и использования мощных источников питания. Поэтому часто предпочтение отдается другим методам контроля, несмотря на их низкую производительность и большую трудоемкость.

Возможности метода значительно повысились после разработки авторами способа МГК, основанного на намагничивании контролируемого объекта перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель, а также методики

контроля с использованием визуализирующей магнитные поля пленки [1, 10, 12, 13]. Авторами проведены исследования по оптимизации условий контроля, определению новых информационных параметров сигналов, обусловленных дефектами, позволившие уменьшить пропуск дефектов и повысить селективность метода. Разработаны программа для ЭВМ аппаратного комплекса, осуществляющая яркостную индикацию сигналов от дефектов; малогабаритные устройства для реализации способа, которые в десятки раз легче существующих технических средств; методики контроля ферромагнитных объектов с использованием визуализирующей магнитные поля пленки; программа, позволяющая произвести количественную оценку полученных на ней индикаторных рисунков дефектов.

Систематизируем полученные за последние годы результаты, заострив внимание на наиболее значимых из них, и определим перспективные направления применения магнитографической дефектоскопии в машиностроении.

Экспериментально установлено, что при МГК с намагничиванием контролируемого объекта перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель и считывании записи с ленты дифференциальным индукционным преобразователем трещины, сквозные и узкие несквозные несплавления обна-

руживаются двуполярным электрическим импульсом, а дефекты «с дном» (риски, углубления от поверхностных неровностей, широкие несквозные несплавления) выявляются в зависимости от условий контроля однополярным, трансформированным или двуполярным сигналом (рис. 1). Изменение вида сигнала, обусловленного дефектом «с

дном», и смена его полярности происходят при удалении магнита от поверхности объекта, увеличении его высоты, переходе от намагничивания «углом вперед» к намагничиванию «углом назад», изменении угла наклона магнита, глубины дефекта, крутизны характеристики магнитной ленты [2, 5–7].

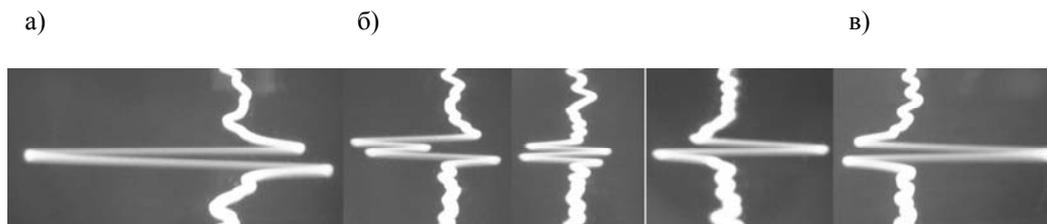


Рис. 1. Трансформация сигнала, обусловленного дефектом, при намагничивании объекта перпендикулярно поверхности перемещаемым постоянным магнитом с близкорасположенными полюсными гранями: а – расстояние Δ от полюса магнита до объекта 0,2 мм; б – $1,75 \leq \Delta \leq 2,25$ мм; в – $\Delta = 4$ мм

Для постоянного магнита с коэрцитивной силой $H_c = 2400$ А/см и остаточной индукцией $B_r = 0,39$ Тл экспериментально определены условия, при которых одновременно обеспечиваются наибольшая чувствительность метода контроля и селективность к виду дефекта, при этом наиболее опасные дефекты (трещины, сквозные и узкие несквозные несплавления) обнаруживаются двуполярными сигналами, а другие несплошности (риски, углубления от поверхностных неровностей, широкие несквозные несплошности) – однополярными:

– при записи на низкокоэрцитивную ленту ($H_c = 80$ А/см) угол наклона магнита к поверхности объекта – от 0 до 5° или от 85 до 90° при намагничивании «углом назад», от 40 до 60° – «углом вперед»;

– если магнит обращен к объекту гранью с одним полюсом, то расстояние Δ между объектом контроля и магнитом должно быть от 0 до $0,4$ мм или от 4 до 11 мм, высота L магнита от $6,5$ до 13 мм или от 39 до 130 мм;

– при записи на высококоэрцитивную ленту ($H_c = 260$ А/см) Δ должно

быть от $0,4$ до 11 мм, а L – от 39 до 130 мм в исследованном диапазоне $6,5 \leq L \leq 130$ мм;

– если магнит обращен к объекту гранью с двумя полюсами, то Δ должно быть минимальным, средняя часть магнита на отрезке, составляющем около 70 % длины грани магнита, должна перекрывать всю ширину ленты, а плоскость, разделяющая полюсы магнита, образовывать минимальный угол (но не более 20°) с направлением перемещения магнита, совпадающим с предполагаемым направлением протяженного дефекта в изделии.

Это позволяет отличить наиболее опасные дефекты от других несплошностей по виду сигнала. При этом минимальное раскрытие уверенно обнаруживаемого дефекта составляет 5 мкм, минимальная глубина обнаруживаемого поверхностного дефекта – 150 мкм, дефекты обнаруживаются на глубине до 3 мм [2–7, 9]. Высокая чувствительность метода контроля при малой массе магнита (20...50 г) объясняется контролем объектов в приложенном поле, высокой напряженностью магнитного поля

в зоне дефекта при приближении к нему магнита, однородным максимальным полем, создаваемым магнитом в контролируемой зоне при его перемещении над уложенным на контролируемый объект магнитоносителем.

При установленных выше условиях контроля предложены два новых информационных параметра сигналов, обусловленных дефектами: *вид сигнала*, т. к. сигнал принимает однополярный или двухполярный вид в зависимости от наличия или отсутствия «дна» у несплошности, что позволяет повысить селективность метода; *размах* (вместо амплитуды), т. к. смена полярности сигнала при изменении условий контроля происходит, минуя стадию перехода через ноль его размаха, что позволяет исключить пропуск дефектов и повысить достоверность контроля [6, 7, 11].

Методом графической аппроксимации предельного и частных циклов гистерезиса по полученным ранее формулам показано и экспериментально подтверждено, что вид сигнала (однополярный, двухполярный, трансформированный), обусловленного дефектом, зависит от соотношения между остаточной намагниченностью участка ленты, находившегося в зоне действия поля рассеяния дефекта, и ее остаточной намагниченностью, вызванной полем перемещаемого магнита. Это соотношение может изменяться вследствие гистерезисных явлений в магнитной ленте при изменении величины намагничивающего и (или) размагничивающего поля, величины поля рассеяния дефекта, т. к. на следе перемещаемого постоянного магнита тангенциальное направление намагничивания, а в ряде случаев нормальное поверхности контролируемого объекта, изменяется на противоположное [2, 3, 5–8, 11].

Установлено, что сигнал, обусловленный дефектом, при считывании записи с ленты дифференциальной магнитной головкой имеет однополярный или трансформированный вид, если од-

на часть ленты под влиянием поля рассеяния дефекта приобретает большую, вторая – равную, а третья – меньшую остаточную намагниченность $M_{rл}$, чем лента под действием внешнего поля M_{r0} . Если $M_{rл} > M_{r0}$ или $M_{rл} < M_{r0}$, то сигнал имеет двухполярный вид, а полярность его полувольт зависит от того, большую или меньшую остаточную намагниченность приобретают участки магнитной ленты в зоне дефекта по сравнению с ее участками, находившимися под действием внешнего поля (см. рис. 1).

Дано объяснение причин смены полярности сигнала, обусловленного дефектом, при действии только нормальной или только тангенциальной составляющей внешнего поля, перемещаемого над лентой магнита [8, 11].

При намагничивании контролируемого объекта наклоненным к его поверхности перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель тангенциальная составляющая внешнего поля направлена сначала в одну, а затем в противоположную сторону, а напряженности этих полей отличаются по модулю. Приведем объяснение причины смены полярности сигнала, обусловленного дефектом, при действии только тангенциальной составляющей напряженности внешнего магнитного поля, изменяющего направление на противоположное [8]. Характер записи поля рассеяния дефекта на магнитоноситель при изменении глубины дефекта в этом случае проанализирован на рис. 2 и 3.

Как видно из рис. 3, при намагничивании объекта с уложенной на его поверхность магнитной лентой в *одном направлении* большей величине поля рассеяния дефекта соответствует большая остаточная намагниченность ленты, т. к. запись полей рассеяния дефектов происходит на возрастающей кривой первоначального намагничивания ее магнитной характеристики. При намагничивании в *противоположном направлении* вследствие гистерезисных явлений в ленте и записи полей на ниспа-

дающей ветви петли гистерезиса ее участки, находившиеся в поле рассеяния дефекта большей напряженности, по мере роста крутизны ветви петли гисте-

резиса на ее частном цикле приобретают меньшую остаточную намагниченность, чем участки, находившиеся в слабом поле.

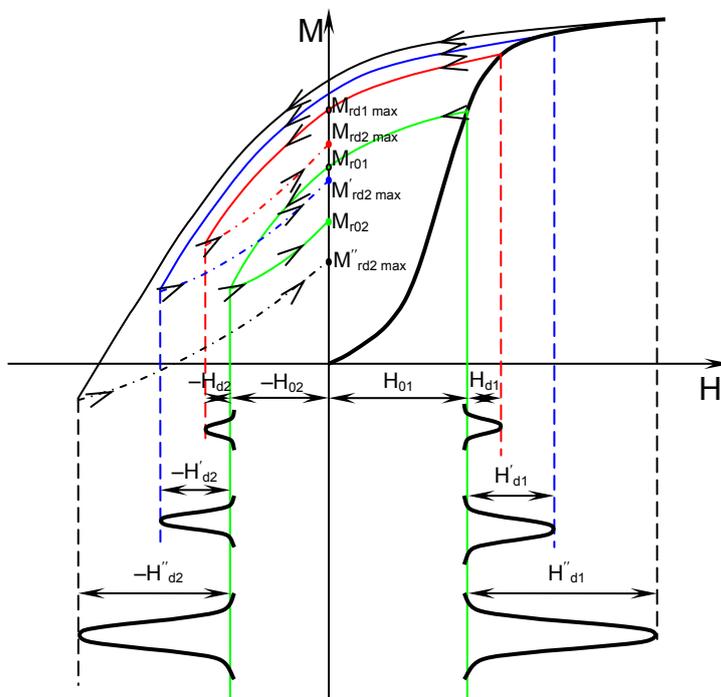


Рис. 2. К пояснению записи на магнитноситель полей рассеяния дефектов малой, средней и большой глубины при тангенциальном намагничивании объекта контроля сначала в одном, а затем противоположном направлении

Поэтому остаточная намагниченность ленты в зоне действия поля несплошности малой глубины имеет колоколообразный, а сигнаграмма – двуполярный вид (см. рис. 3, а, I и II), и в зоне несплошности средней глубины приобретает седлообразную форму (см. рис. 3, б, I). Соответствующая ей сигнаграмма имеет трансформированный (см. рис. 3, б, II), а при большой глубине несплошности – двуполярный вид (см. рис. 3, в, II). Полярность полувольт сигнала зависит от того, большую или меньшую остаточную намагниченность приобрела лента в месте действия поля рассеяния дефекта по сравнению с ее остаточной намагниченностью, обусловленной внешним полем (см. рис. 2 и 3, а, I и в, I). Таким образом, из рис. 3, II видно, что при

действии только тангенциальной составляющей внешнего поля, изменяющего направление на противоположное, вследствие гистерезисных явлений в магнитной ленте сигнал о наличии дефекта при увеличении его глубины может приобрести трансформированный вид или сменить полярность полувольт.

Так как остаточная намагниченность ленты в зоне действия поля рассеяния дефекта зависит от величины намагничивающего и (или) размагничивающего поля, величины поля рассеяния дефекта и крутизны магнитной характеристики ленты, то от этих факторов зависит вид сигнала (однополярный, двуполярный, трансформированный), обусловленного дефектом.

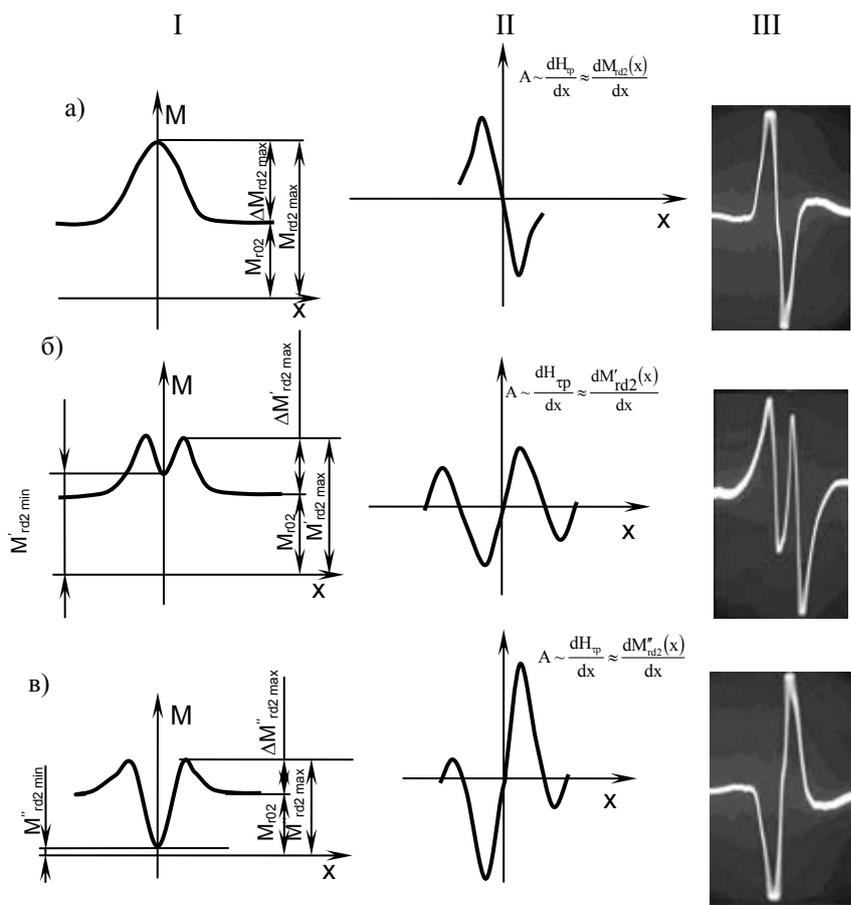


Рис. 3. Характер изменения остаточной намагниченности ленты и сигнала от дефекта с увеличением его глубины при намагничивании объекта контроля параллельно поверхности сначала в одном, а затем в противоположном направлении: I – изменение остаточной намагниченности ленты в зоне действия поля рассеяния дефекта при увеличении глубины дефекта; II, III – теоретические и реальные сигналограммы соответственно; а, б, в – остаточная намагниченность магнитной ленты и вид сигналограммы при обнаружении дефектов малой, средней и большой глубины соответственно

Это подтверждается экспериментально при моделировании исследуемого способа МГК путем намагничивания контролируемой зоны объекта с уложенной магнитной лентой полем электромагнита сначала в одном, а затем в противоположном направлении (см. рис. 3, III) [8]. При построении графиков, изображенных на рис. 2, ориентировались на кривые возврата, построенные по полученным ранее формулам.

Для визуализации полей дефектов разработана программа для ЭВМ аппаратного комплекса, осуществляющая яркостную индикацию полей дефектов [5]. При яркостной индикации изображения полей дефектов с дном (риски,

вмятины, широкие несквозные несплавления и т. д.) на экране проявляются в виде светлых участков, повторяющих конфигурацию дефектов, трещины – в виде черных линий, по обе стороны которых наблюдаются широкие светлые полосы (рис. 4).

Для отстройки от помех в программе реализована амплитудная и низкочастотная фильтрация сигнала.

Таким образом, разработан и подробно исследован способ магнитографического контроля, основанный на намагничивании контролируемого ферромагнитного объекта через уложенный на его поверхность магнитоноситель, позволивший повысить мобильность

дефектоскопии, осуществить контроль объектов в труднодоступных местах, не только обнаружить несплошности, но и отличить наиболее опасные дефекты от других. Назовем в связи с этим перспективные направления применения магнитографической дефектоскопии в машиностроении при использовании обычной магнитной ленты для записи полей дефектов:

- контроль деталей в узлах без их разборки в процессе ремонта. Он стал возможен, т. к. при намагничивании объекта через магнитную ленту используются малогабаритные постоянные магниты;

- контроль стального литья до его чистовой обработки, чтобы не только обнаружить дефекты, но и отличить

трещины и неслитины от рисок и углублений поверхностных неровностей по виду сигнала;

- контроль зоны термического влияния сварных соединений, чтобы отличить трещины от мнимых дефектов, обусловленных структурными неоднородностями;

- контроль стальных изделий после термической обработки непосредственно на рабочем месте, чтобы оперативно выявить трещины и исключить их появление в дальнейшем путем корректировки режимов термообработки;

- инспекционный контроль, позволяющий оперативно определить наличие наиболее опасных дефектов – трещин, сквозных и узких несквозных несплошностей.

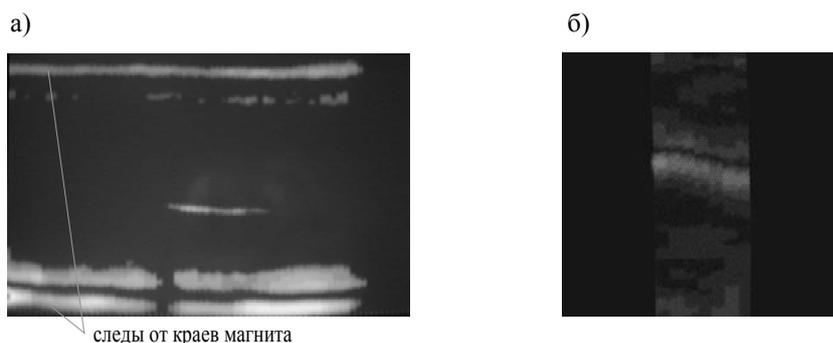


Рис. 4. Дефектограммы образцов с риской и трещиной: а – образца с риской; б – образца с трещиной

Рассмотрим более подробно второе направление использования магнитографической дефектоскопии – контроль с использованием визуализирующей магнитные поля пленки.

Известными средствами визуализации магнитных полей рассеяния дефектов сплошности ферромагнитных изделий являются магнитные порошки, суспензии, магнитные жидкости, магнитная лента для магнитографической дефектоскопии, феррит-гранатовая пленка и др. В последние годы для визуализации магнитных полей разработана специальная пленка, которая содержит залитые в гель подвижные частички никеля. В за-

висимости от своего расположения эти частички по-разному отражают падающий свет. Пленка окрашивается в темные тона, когда магнитное поле направлено под прямым углом к ее поверхности, и в светлые, когда направление магнитного поля параллельно поверхности. Пленка изготавливается на основе нанотехнологий и имеет толщину 0,15 мм. Описано применение таких пленок для визуализации создаваемых постоянными магнитами и намагниченными объектами полей, по которым судят о свойствах объектов. Авторами проведены исследования по определению возможности применения визуализирующей

магнитные поля пленки для обнаружения дефектов сплошности ферромагнитных изделий.

Для исследований применяли образцы с искусственными и естественными дефектами сплошности. Контроль объектов производили без предварительной зачистки поверхности деталей.

Намагничивание деталей осуществляли постоянными магнитами или электромагнитом. После намагничивания объекта с уложенной на него пленкой перемещаемым постоянным магнитом на пленке появились очертания стенки объекта контроля и индикаторный рисунок дефекта (рис. 5).

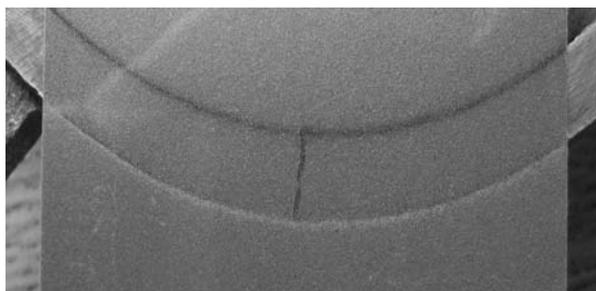


Рис. 5. Индикаторный рисунок трещины раскрытием 34 мкм в щите электродвигателя после намагничивания перемещаемым постоянным магнитом через пленку

Аналогичные исследования выполнены и на Т-образных стальных образцах (длина образца – 35 мм, наибольшая ширина – 14 мм). Соответствующий вид индикаторных рисунков

дефектов при контроле в приложенном поле перемещаемого постоянного магнита изображен на рис. 6, а. Было обнаружено 14 поверхностных трещин.

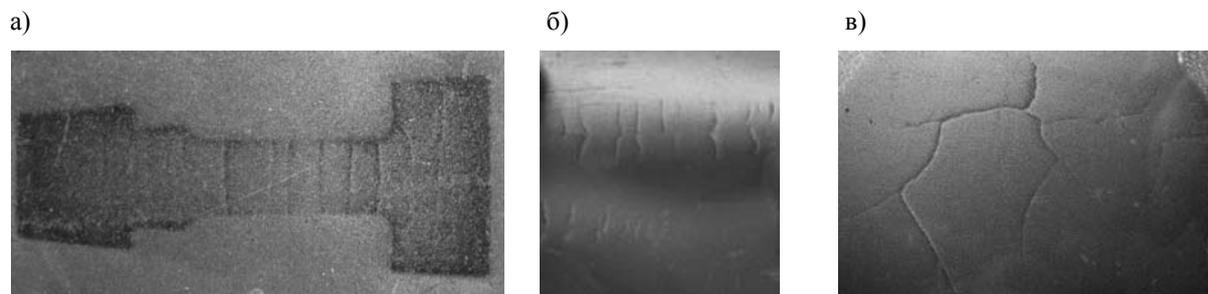


Рис. 6. Индикаторные рисунки поверхностных трещин: а – на Т-образном образце в приложенном поле перемещаемого над пленкой постоянного магнита; б – поперечных трещин на выпуклости шва при контроле на остаточной намагниченности; в – на диске при контроле на остаточной намагниченности

Затем Т-образный образец контролировали визуально-оптическим методом с использованием микроскопа ЕС МЕТАМ РВ-21, допускающего погрешность измерений ± 1 мкм. Было подтверждено наличие в образце 14 поверхностных трещин, которые имели ширину: (4 ± 1) мкм (три трещины), (5 ± 1) мкм

(две трещины), (6 ± 1) мкм (три трещины), (7 ± 1) мкм (две трещины), (8 ± 1) мкм (одна трещина), (10 ± 1) мкм (две трещины), (28 ± 1) мкм (одна трещина) [10].

Дальнейшие исследования показали, что минимальное раскрытие обнаруживаемых наружных трещин при записи полей дефектов на визуализирую-

щую магнитные поля пленку составляет 1...2 мкм (рис. 6, б, в), а при традиционном методе магнитографического контроля с записью магнитных полей рассеяния на магнитную ленту – 5 мкм.

Пленка позволяет обнаружить перебитые номера кузовов автомобилей (рис. 7), визуализировать поля дефектов сплошности ферромагнитных объектов и в ряде случаев может быть использована для их дефектоскопии. Наиболее четкие индикаторные рисунки наблюдаются для дефектов, расположенных на наружной поверхности контролируемой детали. Наибольшая разрешаю-

щая способность метода имеет место при контроле в приложенном поле магнита, перемещаемого над лентой (за исключением случая контроля сварных соединений на наличие поверхностных трещин). Дефекты внутренней поверхности выявляются только при контроле в приложенном поле электромагнита. Отверстия диаметром 3 мм обнаруживаются и на глубине 23 мм. Крупные протяженные несплошности могут быть обнаружены, даже если индикаторная пленка находится на расстоянии 4...5 мм от поверхности объекта.

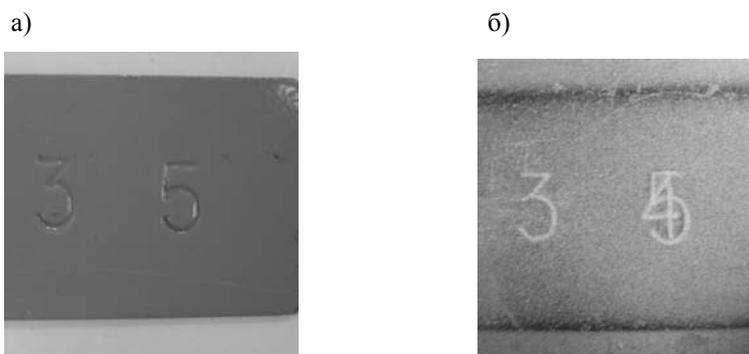


Рис. 7. Контроль номеров кузовов автомобилей: а – изображение образца с перебитым номером; б – индикаторные рисунки цифр номера кузова автомобиля

По появлению индикаторных рисунков на магнитной пленке можно установить наличие дефектов в изделии, однако сложно количественно оценить их параметры. Поэтому в [12, 13] исследовано влияние предварительной подготовки магнитной пленки, параметров несплошностей и условий контроля на количественные характеристики индикаторных рисунков. Установлена зависимость численных значений интенсивности окраски магнитной пленки, визуализирующей поле, от ее предварительной подготовки и напряженности действующего на нее намагничивающего поля. Рассмотрены вопросы количественной оценки индикаторных рисунков дефектов различного типа и вида при контроле на остаточной намагниченности с визуализацией их полей.

Проведены исследования влияния параметров дефектов и условий контроля на количественные характеристики индикаторных рисунков дефектов на пленке при контроле в приложенном поле.

Установлено, что с увеличением глубины дефекта внутренней поверхности размах сигнала возрастает, причем при малых режимах намагничивания (до 96 А/см) крутизна кривых увеличивается с ростом глубины несплошности, при $H = 96$ А/см – остается постоянной, а при более высоких режимах – уменьшается при возрастании H . С увеличением напряженности поля размах сигнала сначала возрастает, а затем стабилизируется, причем чем больше глубина несплошности, тем при меньшей напряженности поля происходит стабили-

зация размаха сигнала. Дефекту большей глубины соответствует больший размах сигнала. Ширина сигнала, обусловленного дефектом внутренней поверхности, с ростом ширины дефекта изменяется монотонно. Влияние ширины дефекта внутренней поверхности на размах обусловленного им сигнала, получаемого на пленке, в приложенном поле при низких напряженностях намагничивающего поля немонотонно. В диапазоне режимов намагничивания $192 \leq H \leq 480$ А/см с ростом ширины дефекта происходит резкий спад размаха сигнала. Размах сигнала, обусловленного дефектом наружной поверхности, для дефектов различной ширины с ростом напряженности намагничивающего поля сначала увеличивается, а затем плавно уменьшается и стабилизируется. При этом большему дефекту соответствует больший размах сигнала. Ширина сигнала, обусловленного дефектом внутренней поверхности, возрастает линейно с увеличением ширины дефекта. В диапазоне напряженностей $96 \leq H \leq 480$ А/см ширина сигнала мало зависит от режима намагничивания.

Размах сигнала, обусловленный дефектом наружной поверхности, для режимов намагничивания менее 256 А/см при увеличении глубины дефекта до 1 мм сначала резко возрастает, а затем плавно увеличивается. Для режимов намагничивания более 256 А/см зависимость размаха сигнала от глубины дефекта линейна и практически не зависит от режима намагничивания. Размах сигнала, обусловленного дефектом наружной поверхности, при увеличении напряженности поля сначала круто возрастает, а при напряженности поля более 300 А/см остается практически постоянным и мало зависит от глубины дефекта. С увеличением глубины дефекта ширина сигналов, обусловленных дефектами наружной поверхности, сначала увеличивается, а затем, достигнув своего максимума, уменьшается. Кривые тем раньше достигают максимума,

чем меньше глубина дефекта. Ширина сигнала, обусловленного дефектом наружной поверхности, с увеличением раскрытия несплошности монотонно увеличивается и мало зависит от режима намагничивания.

С ростом напряженности поля размах сигналов, обусловленных дефектами, расположенными на различной глубине от поверхности объекта, возрастает, достигая постоянной величины при напряженности поля тем большей, чем больше глубина залегания дефекта. Закономерности нарушаются при приближении несплошности к внутренней и наружной поверхности образца (глубина залегания дефекта 2,5 и 22,5 мм).

Размах сигналов, обусловленных дефектами наружной и внутренней поверхности (при различных расстояниях между контролируемым объектом и пленкой), возрастает с увеличением напряженности намагничивающего поля, а затем стабилизируется. Чем меньше расстояние от пленки до объекта, тем при большей напряженности поля стабилизируется размах сигнала, вызванного дефектом.

Угол наблюдения должен составлять от -50 до $+50^{\circ}$ к нормали к поверхности пленки.

По результатам исследований разработаны методики контроля различных объектов с использованием визуализирующей магнитные поля пленки.

Назовем в связи с этим перспективные направления применения магнитографической дефектоскопии в машиностроении при использовании магнитной пленки, визуализирующей магнитные поля:

– контроль деталей в узлах без их предварительной разборки. Он стал возможен, т. к. визуализирующую магнитные поля пленку можно поместить в труднодоступное место и бесконтактно намагнитить контролируемую зону малогабаритным перемещаемым постоянным магнитом;

– контроль стальных отливок без

их чистовой обработки, позволяющий отстроиться от помех, обусловленных поверхностными неровностями, при обнаружении внутренних несплошностей; его возможность объясняется тем, что поля наружных неровностей с удалением точки наблюдения от поверхности объекта убывают на порядок быстрее, чем поля внутренних несплошностей;

– контроль наличия технологических отверстий, выступов и углублений на поверхности контролируемого объекта через слой изоляции, т. к. индикаторные рисунки таких элементов наблюдаются при достаточно большом расстоянии от пленки до поверхности объекта;

– непрерывный контроль момента образования трещин в местах с высокой концентрацией механических напряжений. Визуализирующая поля пленка может быть закреплена на поверхности объекта, а постоянный магнит или электромагнит может находиться на большом удалении от объекта;

– высокопроизводительный контроль объектов больших размеров (пленка закрепляется в межполюсном пространстве электромагнита и перемещается вместе с ним вдоль контролируемой зоны). Получаемое на ней изображение в реальном режиме времени выводится на экран;

– контроль объектов, находящихся во взрывоопасных местах. Для намагничивания объекта используется постоянный магнит;

– контроль номеров кузовов автомобилей (применяемые устройства, простые, дешевые и высокопроизводительные, позволяют осуществлять контроль в полевых условиях с использованием для намагничивания контролируемой зоны постоянных магнитов);

– инспекционный контроль, позволяющий оперативно определять наличие и получать индикаторные рисунки наиболее опасных дефектов – трещин, сквозных и узких несквозных несплошностей.

Таким образом, в настоящей работе проведен обзор новых теоретических и экспериментальных исследований в области магнитографической дефектоскопии, выполненных авторами. Описаны результаты исследований с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса, осуществляющего яркостную индикацию сигналов от дефектов с записью полей дефектов на визуализирующую магнитные поля пленку. Указаны перспективные направления применения магнитографической дефектоскопии в машиностроении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2154818 RU, МКИ 7 G 01 N 27 / 85. Способ магнитографического контроля ферромагнитных изделий / В. А. Новиков ; заявитель и патентообладатель Могилев. машиностр. ин-т. – № 96111357 ; заявл. 03.06.96 ; опубл. 20.08.00, Бюл. № 23. – 8 с. : ил.
2. Новые возможности магнитографической дефектоскопии / В. А. Новиков [и др.] // Промышленная безопасность на взрывоопасных и химически опасных производственных объектах : сб. науч. тр. – Уфа, 2009. – С. 163–168.
3. Пат. 6102 С 1 ВУ, МПК G 01 N 27 / 85. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов и устройство для его осуществления / А. В. Кушнер, В. А. Новиков ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № а20001118 ; заявл. 19.12.00 ; опубл. 30.06.04, Бюл. № 12. – 5 с.
4. Новиков, В. А. Магнитографический контроль объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель. Схемы намагничивания / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 6. – С. 30–35.
5. Кушнер, А. В. Программно-аппаратный комплекс для магнитографического контроля / А. В. Кушнер, А. В. Шилов, В. А. Новиков // Дефектоскопия. – 2010. – № 6. – С. 36–40.
6. Новиков, В. А. Экспериментальное исследование магнитографического контроля объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель I / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 7. – С. 42–50.
7. Новиков, В. А. Экспериментальное исследование магнитографического контроля объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель II / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Ши-

лов // Дефектоскопия. – 2010. – № 7. – С. 51–58.

8. **Новиков, В. А.** Запись поля дефекта на магнитную ленту при тангенциальном намагничивании полями последовательно противоположных направлений / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 54–60.

9. **Пат. 12939 С 1 ВУ, МПК G 01 N 27 / 82.** Способ магнитографического контроля изделия из ферромагнитного материала (варианты) / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № а20001118; заявл. 21.11.07; опубл. 28.02.10, Бюл. № 1.– 4 с.

10. **Новиков, В. А.** Визуализация полей дефектов ферромагнитных объектов с помощью магнитной пленки / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер // Контроль. Диагностика. – 2010. –

№ 5. – С. 18–22.

11. Исследование вида сигналограмм при магнитографическом контроле с намагничиванием объекта через магнитоноситель / В. А. Новиков [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2004. – № 4. – С. 15–20.

12. **Шилов, А. В.** Количественная оценка индикаторных рисунков дефектов при визуализации их полей на магнитной пленке / А. В. Шилов, В. А. Новиков, А. В. Кушнер // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 152–160.

13. **Шилов, А. В.** Количественная оценка индикаторных рисунков дефектов при визуализации их полей на магнитной пленке в приложенном поле / А. В. Шилов, В. А. Новиков, А. В. Кушнер // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 160–168.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 09.03.2011

**V. A. Novikov, G. I. Skryabina,
A. V. Shilov, A. V. Kushner
Perspective directions of magnetic
tape testing in mechanical engineering**

The review of new theoretical and experimental researches in the sphere of magnetic tape testing executed by the authors is presented in the article. The results of the researches with the use of the developed hardware-software complex which carries out brightness indication of signals from defects, with record of the fields of defects on a film visualising magnetic fields have been described. Perspective directions of magnetic tape testing use in mechanical engineering are given in the paper.

УДК 681.9.06.002.2

А. Н. Рязанцев, доц.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ВЫБОРА В САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотрена оригинальная методика автоматизированного синтеза гибридных структурно-логических моделей средствами реляционных СУБД для систем автоматизации проектирования технологических процессов. Автоматизированный синтез универсальных структурно-логических моделей позволяет значительно сократить затраты времени на создание и настройку баз знаний систем автоматизированного проектирования технологических процессов для машиностроительного производства.

Одним из путей сокращения сроков технологической подготовки машиностроительного производства является повышение уровня автоматизации проектирования технологических процессов и средств их оснащения. В настоящее время на предприятиях отрасли, внедривших для решения задач технологической подготовки производства САПР технологических процессов, используются диалоговые режимы проектирования. Диалоговый режим проектирования обеспечивает высокую гибкость при проектировании технологии и позволяет охватить автоматизированным проектированием достаточно большую номенклатуру изделий при минимальных затратах времени на адаптацию системы к организационно-техническим условиям предприятия. Но при использовании диалогового режима сокращение затрат времени на проектирование технологии может быть снижено лишь в 3...5 раз, так как значительное количество проектных процедур и операций имеет низкий уровень автоматизации принятия решений.

В то же время существуют методики создания и настройки баз знаний САПР технологических процессов, которые за счет повышения уровня автоматизации проектных процедур и операций в САПР позволяют сократить затраты времени на проектирование технологии механической обработки резанием в десятки и сотни раз [1]. К сожа-

лению, эти возможности САПР технологических процессов на предприятиях машиностроения практически не используются. Это связано со значительными затратами времени, необходимыми для создания и настройки базы знаний САПР технологических процессов при адаптации системы к организационно-техническим условиям предприятия.

Для сокращения затрат времени на создание и настройку базы знаний САПР технологических процессов была разработана оригинальная методика автоматизированного синтеза структурно-логических моделей, которые составляют основу баз знаний САПР технологических процессов.

Большинство проектных задач технологического проектирования относятся к логическим задачам, например, задачи выбора состава и последовательности выполнения технологических операций, состава и последовательности выполнения технологических переходов в операциях технологического процесса, выбора оборудования и средств технологического оснащения. В общем случае [2] логическая функция выбора подмножества различных элементов структуры технологического процесса имеет вид:

$$\Phi \equiv \bigvee_{i=1}^{n_1} (\bigvee_{j=1}^{n_2} (\bigwedge_{k=1}^{n_3} A_k)_j)_i, \quad (1)$$

где i – число возможных решений,

$i = 1, 2, \dots, n_1$; j – число условий, связанных дизъюнкцией, $j = 1, 2, \dots, n_2$; k – число условий, связанных конъюнкцией, $k = 1, 2, \dots, n_3$; A_k – k -е условие выбора.

В области автоматизации решения подобных задач в настоящее время существуют два основных подхода. Первое направление базируется на теории предикатов [2], второе – на теории конечных автоматов [3, 4]. В соответствии со вторым направлением на уровне формализации задачи выбора описываются в виде табличных, сетевых или перестановочных структурно-логических моделей (СЛМ), которые определяются строками булевой матрицы:

$$[S_i \times F(S)] \begin{matrix} F_G & F_n & F_L & F_a & \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 & S_1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & S_2 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & S_3 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & S_4 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & S_5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & S_6 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & S_7 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & S_8 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & S_9 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & S_{10} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & S_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{12} \end{matrix}, \quad (2)$$

где S_i – наборы свойств моделей, определяющие содержание задачи выбора; $F(S)$ – набор свойств; F_G – свойство, определяющее тип графа объекта, проектируемого по данной модели, $F_G = 1$ – простая цепь или путь, в противном случае – $F_G = 0$; F_n – свойство, которое определяет постоянство количества элементов выбираемого объекта, $F_n = 1$ – число элементов a_i постоянно, в противном случае $F_n = 0$; F_L – свойство, определяющее постоянство отношения между элементами выбираемого объекта, $F_L = 1$ – отношение постоянно, в противном случае – $F_L = 0$; F_a – свойство, которое определяет постоянство состава элементов выбираемого объекта, $F_a = 1$ – состав элементов постоянен, в противном случае – $F_a = 0$.

В общем случае модель для решения задачи выбора структуры технологического процесса может быть описана графом G взаимосвязи операторов T и C .

$$G = (T, C), \quad (3)$$

где T – множество допустимых решений, например операций или переходов обобщенного технологического процес-

са, в возможной последовательности их выполнения (вершины графа), $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$; C – множество логических отношений между свойствами порождающей среды, например характеристиками заготовки, детали и ее поверхностей, которые определяют возможные пути на графе (дуги графа), $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$.

В среде реляционной СУБД граф взаимосвязи операторов T и C в логических задачах технологического проектирования может быть представлен в виде таблицы реляционной базы данных (табл. 1).

Подобный подход к формализации логических задач выбора обеспечивает высокую наглядность и выразительность описания решения, а также инвариантность программного обеспечения, необходимого для решения задач подобного типа.

Однако подобные модели имеют существенные недостатки. Это обусловлено тем, что по форме связи между элементами технологического процес-

цесса и критериями выбора сетевые структурно-логические модели могут быть либо только конъюнктивными, либо только дизъюнктивными. Данное обстоятельство приводит к необходимости декомпозиции локальных задач проек-

тирования технологического процесса на ряд подзадач, в которых отдельно используются конъюнктивные и дизъюнктивные сетевые структурно-логические модели.

Табл. 1. Матрица сетевой структурно-логической модели

Множество допустимых решений	Множество логических отношений			
	C_1	C_2	...	C_m
T_1	1			
T_2		1	1	1
...	1		1	
T_n	1	1		

С целью устранения этого недостатка структурно-логических моделей предложена новая оригинальная форма их представления в виде гибридных моделей [5]. Предложенные гибридные структурно-логические модели позволяют выполнить компактное описание конъюнктивных и дизъюнктивных связей между элементами технологического процесса и критериями их выбора.

Кроме того, их использование позволяет совместить процедуры формализации и алгоритмизации логических задач технологического проектирования.

Общая структура гибридной сетевой модели для решения любых логических задач выбора при проектировании технологических процессов приведена в табл. 2.

Табл. 2. Матрица гибридной структурно-логической модели

Множество допустимых решений	Множество логических отношений						Форма связи
	C^k_1	C^k_2		...		C_m	Конъюнктивная
			C^d_3	...	C^d_{m-1}		Дизъюнктивная
T_1							
T_2							
...							
T_{n-1}							
T_n							

Компактность описания задачи выбора на этапе формализации достигнута за счет выделения в матрице структурно-логической модели двух групп логических отношений с конъюнктивной C^k и дизъюнктивной C^d формами связи. Такой подход к описанию формализации

задачи выбора хорошо согласуется с типовыми процедурами обработки данных, которые используются в современных СУБД, что обеспечивает поиск решения средствами реляционных СУБД без разработки специального программного обеспечения.

Широкая номенклатура применяемых средств технологического оснащения, оборудования и видов механической обработки резанием обуславливает весьма большую размерность матриц структурно-логических моделей и связанные с этим определенные трудности при их создании в виде таблиц реляционных баз данных. Выполненные исследования в области формализации логических задач выбора с использованием универсальных, гибридных, сетевых структурно-логических моделей позволили выявить возможность их автоматизированного синтеза в среде ре-

ляционных СУБД.

На основе проведенных исследований [5] предложена методика автоматизированного синтеза гибридных структурно-логических моделей в среде реляционных СУБД. Разработанная методика автоматизированного синтеза гибридных структурно-логических моделей в среде реляционных СУБД для решения задачи автоматизации выбора элементов технологического процесса состоит из простой последовательности типовых проектных операций, которые представлены на рис. 1.

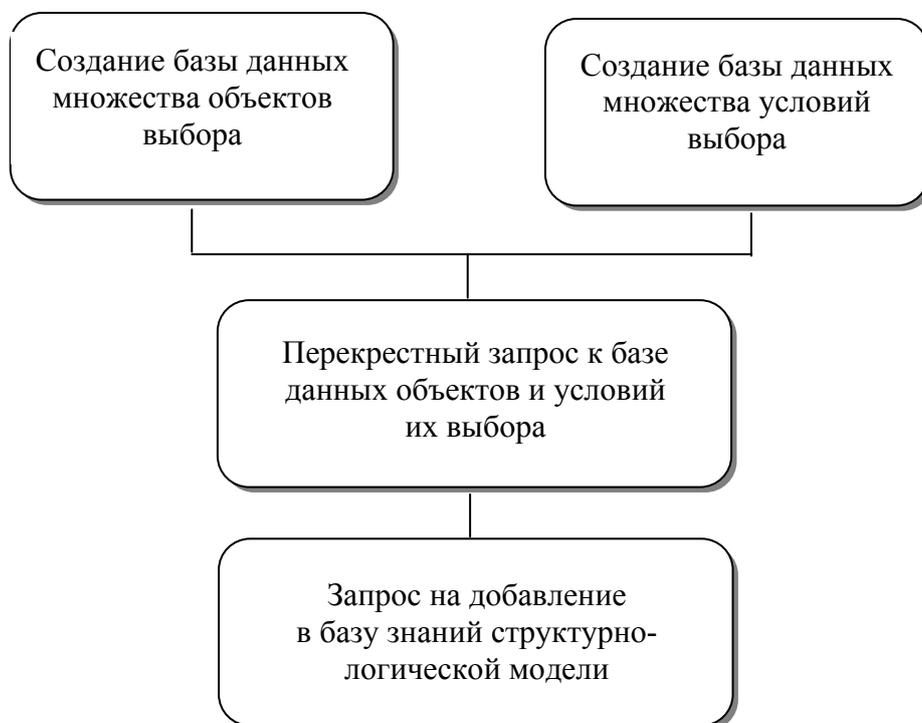


Рис. 1. Проектные операции синтеза структурно-логических моделей для решения логических задач технологического проектирования

На первом этапе средствами СУБД создается таблица базы данных для автоматизированного синтеза матрицы структурно-логической модели, которая содержит множество объектов выбора и условий их выбора в виде логических выражений.

Фрагмент подобной таблицы базы

данных, предназначенной для синтеза структурно-логической модели и используемой для выбора технологического маршрута изготовления ступенчатых валов, представлен на рис. 2.

В таблице базы данных операции обобщенного технологического маршрута располагаются в возможной по-

следовательности их выполнения и представляют, таким образом, упорядоченное множество возможных решений. Упорядочивание множества возможных решений обеспечивается заданием порядкового номера операции в обобщенном технологическом маршруте. Данное правило расположения операций позво-

ляет в дальнейшем успешно решать задачу определения последовательности выполнения операций в проектируемом технологическом маршруте. В одном из полей таблицы базы данных располагаются логические выражения, которые описывают условия включения операций в технологический маршрут.

Наименование операции	Код условия	Условие выбора
Ленточно-отрезная	C1	Заготовка прокат с профилем "Круг"
Рихтовка	C2	=1 (безусловный выбор)
Транспортирование	C3	=1 (безусловный выбор)
Торцеподрезная-центровая	C4	У заготовки требуется наличие центральных отверстий
Токарная с ЧПУ	C5	=1 (безусловный выбор)
Вертикально-сверлильная	C6	У вала имеется одно глухое отверстие перпендикулярное оси
Радиально-сверлильная	C7	У вала имеется более одного глухого отверстия перпендикулярного оси
Радиально-сверлильная	C8	У вала имеется более одного сквозного отверстия параллельного оси
Горизонтально-фрезерная	C9	У вала имеется четырехгранная поверхность
Шпоночно-фрезерная	C10	У вала имеется паз для призматической шпонки
Шлицефрезерная	C11	У вала имеется эвольвентная шлицевая поверхность
Шлицефрезерная	C12	У вала имеется прямоугольная шлицевая поверхность
Слесарная	C13	У вала имеется четырехгранная поверхность
Слесарная	C14	У вала имеется паз для призматической шпонки
Слесарная	C15	У вала имеется эвольвентная шлицевая поверхность
Слесарная	C16	У вала имеется прямоугольная шлицевая поверхность
Закалка ТВЧ	C17	Необходимо выполнить термообработку - закалку ТВЧ
Круглошлифовальная	C18	У вала имеется цилиндрическая поверхность с шероховатостью Ra ≤ 1.6 мкм
Полировальная	C19	У вала имеется цилиндрическая поверхность с шероховатостью Ra ≤ 0,32 мкм
Промывка	C20	=1 (безусловный выбор)
Контроль	C21	=1 (безусловный выбор)

Рис. 2. Фрагмент справочника базы данных технологических операций и условий их выбора

На втором этапе синтеза формируется матрица структурно-логической модели в виде динамического массива

записей базы данных путем создания перекрестного запроса, пример которого на языке запросов SQL приведен ниже.

```

TRANSFORM Count([Справочник операций и условий их выбора].[Номер операции])
AS [Count-Номер операции]
SELECT [Справочник операций и условий их выбора].[Наименование операции]
FROM [Справочник операций и условий их выбора]
WHERE ((([Справочник операций и условий их выбора].[Номер операции])>0))
GROUP BY [Справочник операций и условий их выбора].[Наименование операции],
[Справочник операций и условий их выбора].[Номер операции]
ORDER BY [Справочник операций и условий их выбора].[Номер операции]
PIVOT [Справочник операций и условий их выбора].[Код условия выбора];

```

Фрагмент результатов автоматического синтеза матрицы структурно-логической модели с дизъюнктивной формой связи для выбора технологического маршрута изготовления ступенча-

того вала приведен на рис. 3.

На третьем этапе синтеза для постоянного размещения матрицы в базе знаний системы выполняется запрос на создание таблицы.

Наименование операции	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	
Ленточно-отрезная	1																					
Рихтовка		1																				
Транспортирование			1																			
Торцеподрезная-центровальная				1																		
Токарная с ЧПУ					1																	
Вертикально-сверлильная						1																
Радиально-сверлильная							1	1														
Горизонтально-фрезерная									1													
Шпоночно-фрезерная										1												
Шлицефрезерная											1	1										
Слесарная													1	1	1	1						
Закалка ТВЧ																		1				
Круглошлифовальная																			1			
Полировальная																				1		
Промывка																					1	
Контроль																						1

Рис. 3. Фрагмент результатов автоматического синтеза матрицы структурно-логической модели технологического маршрута изготовления ступенчатого вала

Пример текста запроса на создание таблицы, которая будет содержать ре-

зультаты генерации матрицы структурно-логической модели, приведен ниже.

```
SELECT [Матрица СЛМ].* INTO [tМатрица СЛМ]
FROM [Матрица СЛМ]
```

Полученная приведенным выше способом таблица базы данных может быть использована для принятия решений на соответствующих этапах технологического проектирования. Взаимодействие пользователя с базой знаний, представленной в виде структурно-логической модели (см. рис. 3), на этапе принятия решений реализуется пу-

тем создания запроса с параметрами на основе таблицы, содержащей матрицу СЛМ. В качестве параметров используются заданные условия выбора (см. рис. 2). В этом случае диалог пользователя с экспертной системой протекает в форме вопрос-ответ (1 – да, 0 – нет) (рис. 4).

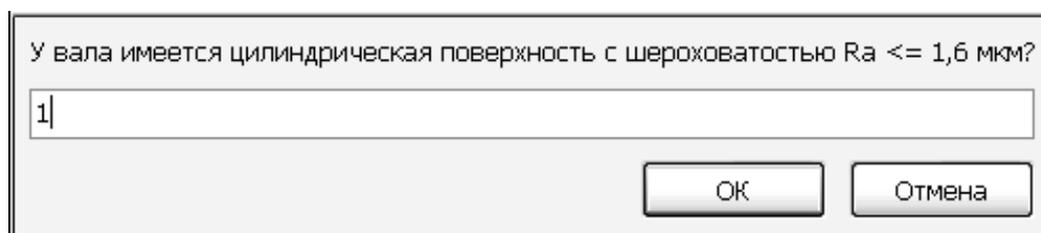


Рис. 4. Диалоговое окно для взаимодействия пользователя с экспертной системой

Запрос с параметрами для организации диалога пользователя с экспертной системой может быть реализован

средствами СУБД на языке SQL, например, в следующем виде:

```
SELECT [МСЛМ Выбор маршрута].[Наименование операции]
FROM [МСЛМ Выбор маршрута]
WHERE ((([МСЛМ Выбор маршрута].C1)=[Заготовка-прокат с профилем "Круг"?]))
OR ((([МСЛМ Выбор маршрута].C2)=1)) OR ((([МСЛМ Выбор маршрута].C3)=1)) OR
((([МСЛМ Выбор маршрута].C4)=[У заготовки требуется наличие центровых отверстий?])) OR
((([МСЛМ Выбор маршрута].C5)=1)) OR ((([МСЛМ Выбор маршрута].C6)=[У вала имеется одно глухое отверстие, перпендикулярное оси?])) OR
((([МСЛМ Выбор маршрута].C7)=[У вала имеется более одного глухого отверстия, перпендикулярного оси?])) OR и т. д. по количеству выбираемых объектов и условий их выбора.
```

Решение задачи выбора элементов структуры технологического процесса в режиме диалога технолога с экспертной системой позволяет повысить качество принимаемых проектных решений и уровень автоматизации проектирования, но затраты времени на решение логических задач все еще остаются достаточно большими.

Значительное сокращение затрат времени и повышение уровня автоматизации проектирования может быть достигнуто путем использования запросов на выборку, у которых параметрами являются предикативные функции вида *If* (*expression*, 1, 0). Функция *If* анализирует логическое выражение *expression* и возвращает 1, если логическое выражение истинно, и 0, если выражение ложно.

В матрице структурно-логической модели (см. рис. 3) форма связи между объектами выбора и условиями выбора C_i является дизъюнктивной. Например, в условиях выбора C_7 , C_8 , C_{18} и C_{19} (см. рис. 2) необходимо отразить еще и наличие конъюнктивной формы связи выбираемых объектов и условий их выбора.

Использование предикативных

функций *If* позволяет устранить эту проблему и реализовать решение логических задач выбора в виде гибридной структурно-логической модели (см. табл. 2). В этом случае задача выбора решается путем создания запроса с использованием таблицы, содержащей дизъюнктивную матрицу структурно-логической модели, и параметров в виде предикативных функций, с помощью которых описываются конъюнктивные связи между условиями выбора. На рис. 5 приведен фрагмент таблицы базы данных, в которой, кроме словесного описания условий выбора, используемых при диалоге пользователь–экспертная система, присутствуют предикативные функции *If*, позволяющие полностью автоматизировать процедуру выбора элементов технологического процесса без участия технолога на основе данных параметрического описания заготовки, детали и ее поверхностей [6].

Запрос с параметрами в виде предикативных функций *If* для автоматического решения задачи выбора может быть реализован средствами СУБД на языке SQL, например, в следующем виде:

```
SELECT [МСЛМ Выбор маршрута].[Наименование операции]
FROM [МСЛМ Выбор маршрута]
WHERE ((([МСЛМ Выбор маршрута].C1)=If([SZ]![VidZag]=1,1,0))) OR ((([МСЛМ
Выбор маршрута].C2)=1)) OR ((([МСЛМ Выбор маршрута].C3)=1)) OR ((([МСЛМ
Выбор маршрута].C4)=If([SP]![Pov]=55,1,0))) OR ((([МСЛМ Выбор маршрута].C5)=1)) OR
((([МСЛМ Выбор маршрута].C6)=If([SP]![Pov]=73,1,0))) OR
((([МСЛМ Выбор маршрута].C7)=If((([SP]![Pov]=73 And [SP]![KolPov]>1),1,0))) OR
((([МСЛМ Выбор маршрута].C8)=If((([SP]![Pov]=71 And [SP]![KolPov]>1),1,0))) OR
((([МСЛМ Выбор маршрута].C9)=If([SP]![Pov]=167,1,0))) OR ((([МСЛМ Выбор маршрута].C10)=If([SP]![Pov]=145,1,0)) и т. д. по количеству предикативных функций If.
```

Код условия	Условие выбора	Предикативная функция
C1	Заготовка прокат с профилем "Круг"	$\Pi f([SZ]![VidZag]=1;1;0)$
C2	=1 (безусловный выбор)	=1
C3	=1 (безусловный выбор)	=1
C4	У заготовки требуется наличие центровых отверстий	$\Pi f([SP]![Pov]=55;1;0)$
C5	=1 (безусловный выбор)	=1
C6	У вала имеется одно глухое отверстие перпендикулярное оси	$\Pi f([SP]![Pov]=73;1;0)$
C7	У вала имеется более одного глухого отверстия перпендикулярного оси	$\Pi f([SP]![Pov]=73 \text{ AND } [SP]![KolPov]>1;1;0)$
C8	У вала имеется более одного сквозного отверстия параллельного оси	$\Pi f([SP]![Pov]=71 \text{ AND } [SP]![KolPov]>1;1;0)$
C9	У вала имеется четырехгранная поверхность	$\Pi f([SP]![Pov]=167;1;0)$
C10	У вала имеется паз для призматической шпонки	$\Pi f([SP]![Pov]=145;1;0)$
C11	У вала имеется эвольвентная шлицевая поверхность	$\Pi f([SP]![Pov]=121;1;0)$
C12	У вала имеется прямоугольная шлицевая поверхность	$\Pi f([SP]![Pov]=130;1;0)$
C13	У вала имеется четырехгранная поверхность	$\Pi f([SP]![Pov]=167;1;0)$
C14	У вала имеется паз для призматической шпонки	$\Pi f([SP]![Pov]=145;1;0)$
C15	У вала имеется эвольвентная шлицевая поверхность	$\Pi f([SP]![Pov]=121;1;0)$
C16	У вала имеется прямоугольная шлицевая поверхность	$\Pi f([SP]![Pov]=130;1;0)$
C17	Необходимо выполнить термообработку - закалку ТВЧ	$\Pi f([SP]![TU2]=1;1;0)$
C18	У вала имеется цилиндрическая поверхность с шероховатостью $Ra \leq 1,6$ мкм	$\Pi f([SP]![Pov] \leq 2 \text{ AND } [SP]![Ra] \leq 1,6;1;0)$
C19	У вала имеется цилиндрическая поверхность с шероховатостью $Ra \leq 0,32$ мкм	$\Pi f([SP]![Pov] \leq 2 \text{ AND } [SP]![Ra] \leq 0,32;1;0)$
C20	=1 (безусловный выбор)	=1
C21	=1 (безусловный выбор)	=1

Рис. 5. Фрагмент справочника технологических операций и условий их выбора с предикативными функциями Πf

Исходными данными для создания запроса служат таблица «МСЛМ Выбор маршрута», содержащая матрицу структурно-логической модели, таблица базы данных «SZ», содержащая сведения о заготовке, и таблица «SP», содержащая сведения о поверхностях детали, которые характеризуют форму, размеры и требования к точности и качеству обрабатываемых поверхностей. Приведенный пример реализует проектную процедуру выбора технологического маршрута, но аналогичным образом могут решаться и другие логические задачи выбора при проектировании технологических процессов, например, выбор оборудования, станочных приспособлений, содержания операций технологического процесса, режущих, вспомогательных, измерительных инструментов.

Предложенная методика автоматизированного синтеза структурно-логических моделей и поиска решений с их использованием позволяет:

– в несколько раз сократить затраты на создание баз знаний при настройке инвариантных систем автоматизированного проектирования технологических процессов на конкретные объекты технологического проектирования;

– более полно реализовать элементы технической имитации искусственного интеллекта в высокоавтоматизированных САПР технологических процессов [1], т. к. обеспечивает решение задачи в автоматическом режиме или в режиме взаимодействия технолога с экспертной системой;

– исключить необходимость разработки специальных программных средств, т. к. все проектные операции, связанные с синтезом структурно-логических моделей и поиском решений реализуются средствами реляционных СУБД;

– повысить качество проектных решений за счет корректной настройки базы знаний САПР технологических процессов;

– сократить затраты машинного времени на решение логических задач; так, время затрачиваемое на поиск решения с использованием структурно-логических моделей почти в 3 раза меньше, чем при последовательном переборе и анализе условий выбора;

– устранить большой объем неавтоматизированных, рутинных операций, которые вынужден выполнять технолог в процессе настройки базы знаний, и тем самым снизить вероятность ошибок.

Разработанная методика использована и прошла проверку при создании учебно-исследовательской САПР технологических процессов на кафедре «Технология машиностроения».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Евгеньев, Г. Б.** Интеллектуальные системы проектирования / Г. Б. Евгеньев. – М. :

МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 376 с. : ил.

2. Диалоговое проектирование технологических процессов / Н. М. Капустин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1983. – 255 с. : ил.

3. **Цветков, В. Д.** Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В. Д. Цветков. – Минск : Наука и техника, 1979. – 264 с. : ил.

4. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении / Г. К. Горанский [и др.] ; под общ. ред. Г. К. Горанского. – М. : Машиностроение, 1976. – 240 с. : ил.

5. **Рязанцев, А. Н.** Автоматизация решения логических задач технологического проектирования средствами реляционных СУБД / А. Н. Рязанцев // Современные технологии, материалы, машины и оборудование : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : МГТУ, 2002. – С. 76–85.

6. **Рязанцев, А. Н.** Информационные аспекты интеграции конструкторских и технологических САПР / А. Н. Рязанцев // Перспективные технологии, материалы и системы : сб. науч. тр. – Могилев, 2003. – С. 340–346.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 16.02.2011

A. N. Rjazancev
The structural models automated synthesis for choice logical problems solution in computer-aided processes planning systems

The original technique of the automated synthesis of hybrid structurally-logical models by means relational DBMS for CAPP systems has been considered. The automated synthesis of universal structurally-logic models allows reducing considerable time spending on design and adjustment of knowledge bases of Computer-Aided Processes Planning systems for machine-building manufacture.

УДК 629.114.2-219.5

И. С. Сазонов, д-р техн. наук, проф., В. А. Ким, д-р техн. наук, проф.,
Н. П. Амельченко, канд. техн. наук, доц., О. В. Билык, канд. техн. наук, доц.,
Э. И. Ясюкович, канд. техн. наук, доц., Д. А. Линник

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ ВОДИТЕЛЯ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

В работе дано теоретическое обоснование способа повышения эффективности линейной виброзащитной системы водителя колесного трактора, основанной на использовании упругодиссипативных элементов с кусочно-линейными характеристиками. На основе анализа результатов моделирования предложена схема подрессоривания кабины водителя колесного трактора, основанная на кусочно-линейных характеристиках упругих элементов и позволяющая гашение низкочастотных колебаний.

Анализ виброзащитных систем колесных тракторов показывает, что повышение эффективности виброзащитных систем водителя колесного трактора, не имеющего задней подвески, требует использования нелинейных упругих элементов подвесок и как следствие, значительных материальных затрат, связанных с применением пневмогидравлических подвесок.

С целью теоретического обоснования эффективной системы подрессоривания кабины трактора (вторичное подрессоривание) с использованием упругодиссипативных элементов, обладающих линейными характеристиками, рассмотрим колебание масс двухмассовой

колебательной модели с линейными характеристиками со следующими показателями системы: $m_1 = 20$ кгс и $m_2 = 4$ кгс – подрессоренные массы; $C_1 = 80$ кгс/см и $C_2 = 20$ кгс/см – коэффициенты жесткости пружин упругих элементов (рис. 1).

Главные частоты колебаний двухмассовой колебательной системы равны:

$$\omega_{1,2} = \frac{c_2 m_1 + (c_1 + c_2) m_2}{2m_1 m_2} g \mp g \sqrt{\left[\frac{c_2 m_1 + (c_1 + c_2) m_2}{2m_1 m_2} \right]^2 - \frac{c_1 c_2}{m_1 m_2}}. \quad (1)$$

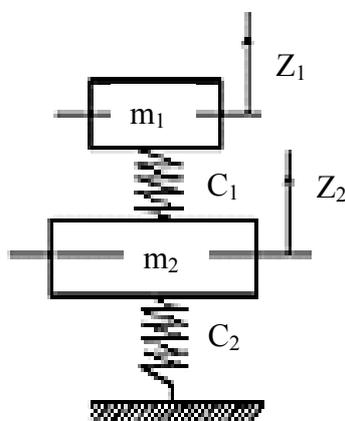


Рис. 1. Двухмассовая колебательная модель

Коэффициенты распределения главных колебаний определим по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= -\frac{c_{11} - \alpha_{11}\omega_1^2}{c_{12} - \alpha_{12}\omega_1^2} = \\ &= -\frac{100 - \frac{20}{g} 2,76g}{-20} = 2,24; \\ \mu_2 &= -\frac{c_{11} - \alpha_{11}\omega_2^2}{c_{12} - \alpha_{12}\omega_2^2} = \\ &= -\frac{100 - \frac{20}{g} 7,24g}{-20} = -2,24. \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрим случай равенства частот главных колебаний ω_1 и ω_2 , которые должны соответствовать равенствам:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{c_1}{\alpha_1}}; \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{c_2}{\alpha_2}}. \quad (3)$$

Случай равенства частот колебаний $\omega_1 = \omega_2$ соответствует условию функционирования динамического гасителя колебаний:

$$\sqrt{\frac{c_1}{m_1}} = \sqrt{\frac{c_2}{m_2}} = \omega_1 = \omega_2 = \omega. \quad (4)$$

При выполнении условия (4) колебание массы m_1 поглощается колебанием массы m_2 . Очевидно, что данное условие можно использовать при предварительных расчетах подвески кабины водителя колесного трактора.

Рассмотрим более сложную модель колебания сиденья водителя-тракториста при условии, что кабина оснащена подвеской. Расчетная схема представлена на рис. 2.

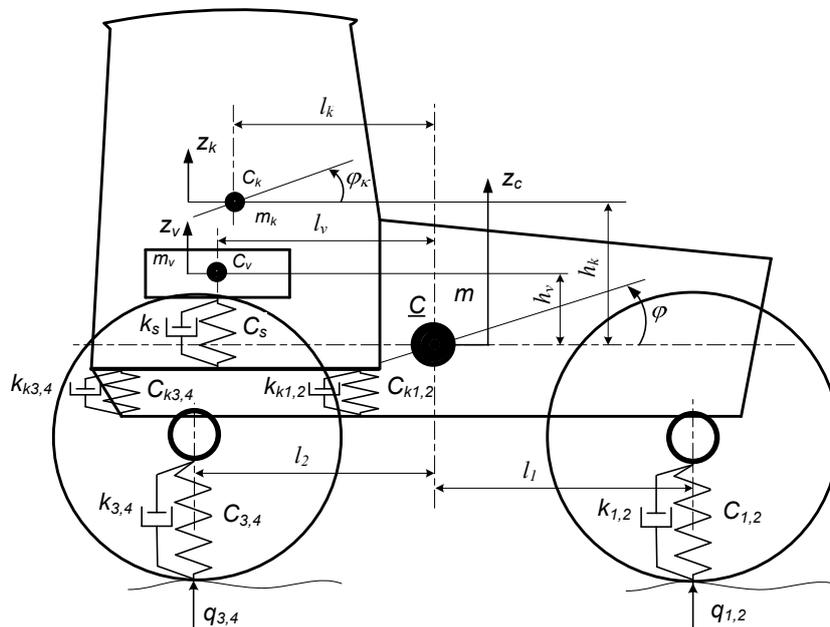


Рис. 2. Расчетная схема колебаний масс колесного трактора с поддресоренной кабиной

Для определенности примем следующее:

– частота собственных колебаний подвески сиденья водителя в существ-

ующих системах находится в пределах 1,5...2 Гц;

– максимальная масса сиденья с водителем $m_{сид} = 90$ кг;

– допускаемое максимальное перемещение $\Delta = 0,15$ м.

Тогда

$$c_{\text{сид}} = \frac{9000}{0,15} = 60000 \text{ Н/м.}$$

Проверим заданную частоту собственных колебаний подвески сиденья $c_{\text{сид}}$:

$$\omega_{\text{сид}} = \sqrt{\frac{c_{\text{сид}}}{m_c}} = \sqrt{\frac{6000}{90}} = 8 \text{ Гц.}$$

Для соблюдения принципа динамического гасителя колебаний значение коэффициента вязкого сопротивления амортизатора подвески сиденья должно всегда удовлетворять условию

$$\alpha_k = \left[\begin{array}{l} C_{\text{сид}} \cdot (Z_k - Z_{\text{сид}})^2 + \\ + C_k \cdot (q - Z_k)^2 - \\ - \alpha_{\text{сид}} \cdot (\dot{Z}_k - \dot{Z}_{\text{сид}})^2 \end{array} \right] / (\dot{q} - \dot{Z}_k)^2, \quad (5)$$

где Z_k – вертикальная координата перемещения кабины трактора; $Z_{\text{сид}}$ – вертикальная координата перемещения сиденья водителя колесного трактора; q – координата перемещения остова трактора; \dot{Z}_k – скорость перемещения кабины при колебаниях; $\dot{Z}_{\text{сид}}$ – скорость вертикального перемещения сиденья водителя.

Зависимость (5) получена для условия равенства интегральных значений потенциальной энергии и диссипативной функции колебательной системы сиденье–кабина.

На основе анализа результатов моделирования предлагается схема подвески кабины колесного трактора, использующая кусочно-линейные характеристики других элементов (рис. 3), что позволяет повысить эффективность виброзащитной системы водителя при низкочастотных воздействиях в диапазоне 1...8 Гц.

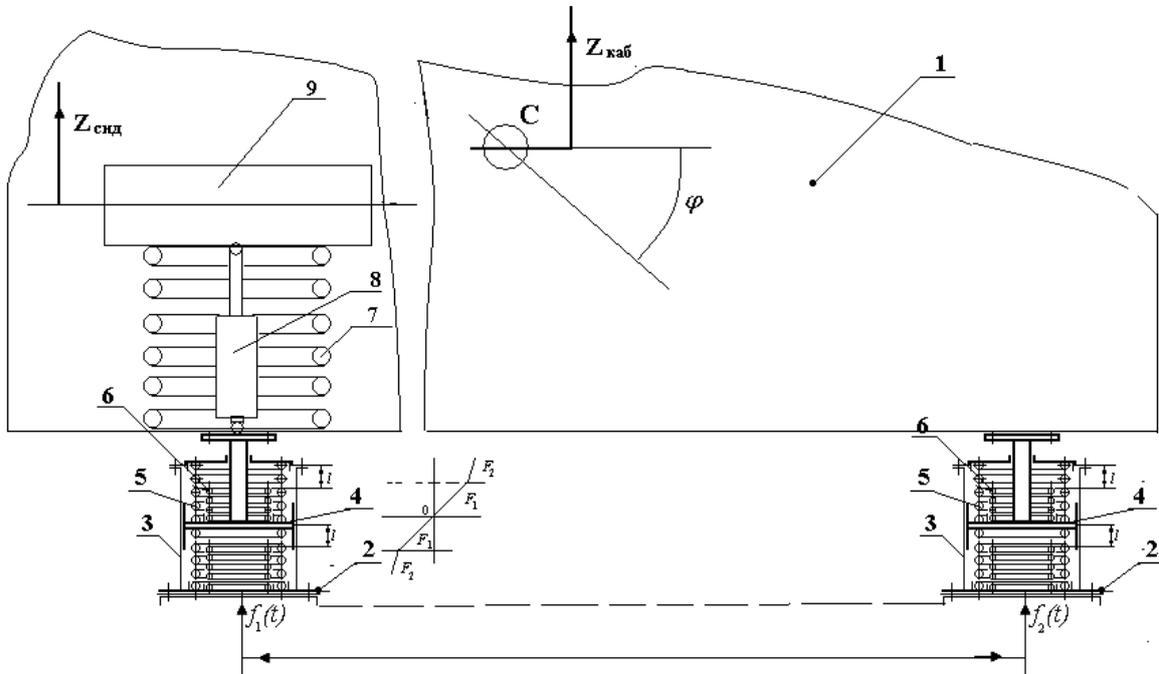


Рис. 3. Схема поддрессирования кабины водителя колесного трактора с использованием кусочно-линейных характеристик упругого элемента: 1 – кабина трактора; 2 – остов трактора; 3 – корпус подвески кабины; 4 – подвижный опорный диск со штоком; 5 – упругая пружина опоры кабины начальной частоты собственных колебаний; 6 – упругая пружина опоры кабины вторичной частоты собственных колебаний; 7 – пружина подвески сиденья; 8 – амортизатор подвески сиденья; 9 – сиденье водителя

Выводы

1. Резонансные частоты колебания сиденья водителя колесного трактора от 1,2 до 5 Гц характерны при движении трактора по полям, подготовленным под посев. Спектральный анализ колебаний сиденья показывает, что на основании упругодиссипативных характеристик, выбранных на основе принципа динамического гасителя колебаний, произойдет существенное снижение среднеквадратичных ускорений на сиденье водителя в указанном диапазоне резонансных частот.

2. Для создания условий эффективной работы динамического гасителя колебаний соотношение частот собственных колебаний подвески сиденья и кабины трактора должны удовлетворять условию

$$\gamma = \frac{k_k}{k_c} \approx 1,$$

где k_k , k_c – частоты собственных колебаний кабины и сиденья водителя колесного трактора.

3. Для соблюдения принципа функционирования динамического гасителя колебаний значение коэффициента вязкого сопротивления амортизатора подвески сиденья должно подчиняться условию

$$\alpha_k = \left[\begin{array}{l} C_{\text{сид}} \cdot (Z_k - Z_{\text{сид}})^2 + \\ + C_k \cdot (q - Z_k)^2 - \\ - \alpha_{\text{сид}} \cdot (\dot{Z}_k - \dot{Z}_{\text{сид}})^2 \end{array} \right] / (\dot{q} - \dot{Z}_k)^2.$$

4. Метод расчета упругодиссипативных характеристик подвески, основанный на балансе потенциальной и диссипативной энергий, позволяет осуществлять практическую реализацию эффективных подвесок кабины водителя колесного трактора, обеспечивающих гашение низкочастотных колебаний сиденья водителя.

Белорусско-Российский университет
Белорусский государственный
аграрный технический университет
Материал поступил 20.04.2011

**I. S. Sazonov, V. A. Kim, N. P. Amelchenko,
O. V. Bilik, E. I. Yasukovich, D. A. Linnik**
**The way to increase the efficiency of linear
vibroprotective system of the wheeled tractor
driver**

In the work the theoretical foundation of the way to increase the efficiency of linear vibroprotective system of the wheeled tractor driver is given. It is based on the use of elastic-dissipative elements with piecewise-linear characteristics. On the basis of analysis of results of modeling the scheme is offered to cushion the cabin of the wheeled tractor driver, based on piecewise-linear characteristics of elastic elements that allows extinguishing low-frequency fluctuations.

УДК 629.114.2-501.22

З. С. Салбиева, М. С. Льянов, д-р техн. наук, проф., И. С. Сазонов, д-р техн. наук, проф., П. А. Амельченко, д-р техн. наук, проф.

ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЯТНИКОВОГО ДАТЧИКА СТАБИЛИЗАЦИИ ОСТОВА СКЛОНОХОДА

В работе приведен анализ изменения частотных характеристик колебаний маятника – датчика системы стабилизации остова крутосклонного колесного трактора при различных кинематических параметрах поступательного перемещения оси подвеса маятника. На основе анализа результатов теоретических исследований дается оценка информативности датчика для его эффективного использования в автоматической системе стабилизации остова крутосклонного трактора при движении машины по равнинной поверхности.

Универсально-пропашные колесные тракторы приспособливают к условиям горного земледелия двумя наиболее распространенными способами: снижением положения центра тяжести трактора и увеличением его колеи; автоматической стабилизацией вертикального положения остова трактора при работе на склоне.

Снижение центра тяжести равнинного трактора осуществляют путем использования колес малого диаметра, что повышает устойчивость трактора на склоне. Такие тракторы называют низкоклинренсными тракторами. При данном способе переоборудование равнинного трактора в низкоклинренский не требует значительных материальных затрат.

Вертикальная стабилизация остова крутосклонного трактора необходима для обеспечения устойчивости движения трактора и создания комфортного условия работы тракториста при работе трактора на склоне (рис. 1, б). Стабилизацию осуществляют с помощью автоматической системы стабилизации остова склонохода. Автоматическая система стабилизации вертикального положения остова трактора основана на информации о положении физического маятника (угол φ), закрепленного к остову трактора. Электрический сигнал, пропорциональный уклону профиля до-

роги, формируется маятником и зависит от его положения по отношению к продольной оси трактора (см. рис. 1).

Автоматическая система осуществляет формирование сигналов управления исполнительными механизмами стабилизации остова трактора при его работе на склоне. При исследовании качания физического маятника наиболее важной задачей исследования является установление закономерностей изменения частот собственных колебаний маятника при воздействии возмущений. Исследование изменения частот собственных колебаний важно, т. к. при определенных частотах возмущений маятник может войти в резонансные колебания, что вызовет формирование ложных сигналов управления системой стабилизации остова. Например, для того чтобы исключить ложные сигналы управления при движении крутосклонного трактора по равнинной поверхности, производят блокировку маятникового механизма. Однако из-за условия обеспечения безопасной работы тракториста на склоне блокировка маятникового механизма не осуществляется. С помощью аналитических методов исследования колебаний маятника можно предсказать эффективность процесса управления автоматической системой стабилизации остова с точки зрения эксплуатационных требований, предъявляемых к ним.

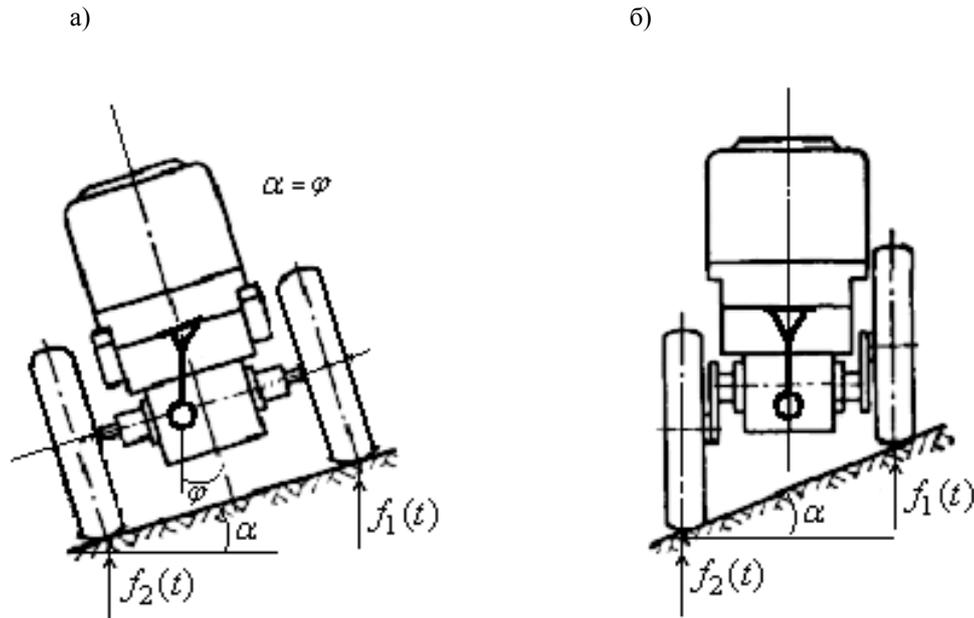


Рис. 1. Схема положения остова трактора на склоне: а – без стабилизации остова; б – с системой стабилизации остова

Как известно, колебание остова трактора подвержено со стороны опорной поверхности $f_1(t)$, $f_2(t)$ (см. рис. 1) случайным возмущениям, оказывающим воздействие на колеса трактора. Поэтому наиболее важной проблемой при проектировании автоматических систем стабилизации остова склонохода является получение достоверной первичной информации, от которой зависит качество формирования сигналов управления исполнительными механизмами склонохода, осуществляющих стабилизацию остова трактора при его работе на склоне.

К системе стабилизации остова крутосклонного трактора предъявляются следующие требования: обеспечение устойчивости, ограничение сползания трактора на склоне при реализации им номинальных тяговых усилий и стабилизация остова трактора. Исходя из этого, рассмотрим простейшую задачу – влияние перемещения оси подвеса маятника на изменение его периодов колебаний.

Определим периоды колебаний маятникового датчика стабилизации остова

крутосклонного трактора (см. рис. 1), когда точка его подвеса закреплена к остову трактора и совершает поступательное перемещение только вдоль вертикальной оси Y (рис. 2): вверх с ускорением a ; вниз с ускорением $a < g$; вниз с ускорением $a = g$; вниз с ускорением $a > g$.

Если происходит перемещение точки подвеса маятника, то абсолютное движение маятника представляет собой сложное движение, состоящее из относительного и поступательного движения маятника. Свяжем переносное движение оси подвеса маятника, совершающего движение вверх с ускорением \bar{a} (см. рис. 2), которое и является переносным движением, с подвижной системой отсчета xOy (точка O). Переносное ускорение \bar{a}_e равно заданному ускорению \bar{a} . Относительным движением маятника по отношению к этой системе будет качание маятника вокруг оси подвеса маятника O . Чтобы определить относительное движение, воспользуемся уравнением относительного движения в случае, когда переносное движение представляет собой поступательное движение:

$$m\vec{a}_r = \sum \vec{P}_i + \vec{\Phi}_e, \quad (1)$$

где $\sum \vec{P}_i$ – сумма всех сил, действующих на маятник; $\vec{\Phi}_e$ – сила инерции в переносном движении.

К маятнику M приложены сила тяжести \vec{G} и реакция стержня маятника \vec{N} . Приложим к точке M переносную силу инерции $\vec{\Phi}_e = -m\vec{\omega}_e$, направленную противоположно переносному ускорению $\vec{\omega}_e$ (направлено вертикально

вниз). Тогда уравнение (1) примет вид:

$$m\vec{a}_r = \vec{G} + \vec{N} + \vec{\Phi}_e. \quad (2)$$

Составим уравнения относительно движения в форме Эйлера:

$$\left. \begin{aligned} m \cdot d^2s_r / dt^2 &= -(G + \Phi_e) \sin \varphi_r = \\ &= -m(g + \omega_e) \sin \varphi_r; \\ m \cdot v_r^2 / \rho &= N - (G + \Phi_e) \cos \varphi_r. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

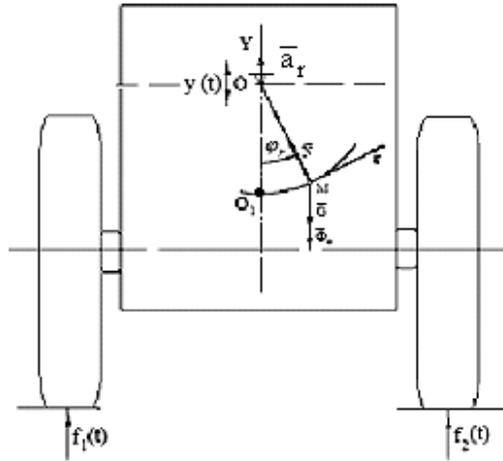


Рис. 2. Схема качания маятника крутосклонного трактора в его поперечной плоскости

Имеем

$$s_r = O_1M = l\varphi_r,$$

тогда

$$d^2s_r / dt^2 = l \cdot d^2\varphi_r / dt^2.$$

Подставим это значение d^2s_r / dt^2 в первое уравнение (3), получим

$$m \cdot l \cdot d^2\varphi_r / dt^2 = -m(g + \omega_e) \sin \varphi_r, \quad (4)$$

или

$$d^2\varphi_r / dt^2 + (g + \omega_e) / l \cdot \sin \varphi_r = 0.$$

Полагая, что угол φ_r мал, принимаем $\sin \varphi_r = \varphi_r$. Тогда уравнение (4) принимает вид:

$$\varphi_r + (g + \omega_e) / l \cdot \varphi_r = 0. \quad (5)$$

На основе уравнения (5) определим частоту и период колебаний маятника:

$$k = \sqrt{(g + \omega_e) / l};$$

$$T = 2\pi \sqrt{l / (g + \omega_e)}. \quad (6)$$

Полученный результат показывает, что при увеличении ускорения переносного движения a_e маятник должен качаться быстрее. Увеличение скорости переносного движения возможно при увеличении скорости движения крутосклонного трактора по случайным неровностям дороги. Поэтому, чтобы не формировать ложный сигнал стабили-

зации, возникает необходимость блокирования движения физического маятника при движении трактора по равнинной местности.

Из уравнения (2) определим модуль силы N (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} N &= (G + \Phi_e) \cos \varphi_r + \frac{mV_r^2}{\rho} = \\ &= mg \cos \varphi_r + m\omega_e \cos \varphi_r + \frac{mV_r^2}{l}. \end{aligned}$$

Относительную скорость V_r в зависимости от угла φ_r можно определить из первого уравнения (3).

В случае, если точка привеса маятника движется вниз с ускорением $a_e < g$, то период колебаний маятника

$$T = 2\pi\sqrt{l/(g - \omega_e)}, \quad (7)$$

т. е. ускоренное движение точки подвеса вниз увеличивает период качаний маятника, что может вызвать ложный сигнал о значительном уклоне профиля дороги. Поэтому при движении склонохода по равнинной местности необходимо блокирование движения маятника.

Если точка подвеса находится в состоянии свободного падения (движение вниз), т. е. $a_e = g$, то колебания маятника не происходит ($T = \infty$).

Если центр масс маятника движет-

ся вниз с большим ускорением, чем ускорение свободного падения, т. е. $a_e > g$, то происходит обратное вращение маятника, т. к. $\Phi_e > G$. Тогда период его качания

$$T = 2\pi\sqrt{l/(\omega_e - g)}. \quad (8)$$

Из вышеизложенного следует, что частота собственных колебаний маятника склонохода не является постоянной и зависит от кинематических характеристик перемещения точки подвеса маятника, т. е. от переносного движения оси подвеса, зависящего, в свою очередь, от частотных характеристик случайных возмущений дорожных неровностей $f_1(t), f_2(t)$. Следовательно, колебания маятника могут выдавать ложные сигналы на формирование сигналов управления исполнительными механизмами склонохода, не соответствующих реальному уклону профиля дороги. Поэтому управление остовом склонохода путем использования информации от физического маятника представляется весьма сложным и требует совершенствования. Для получения достоверной информации для автоматической системы стабилизации остова крутосклонного трактора возникает необходимость в спектральном анализе колебаний масс трактора при случайных воздействиях.

Горский государственный аграрный университет
Белорусско-Российский университет
Объединенный институт машиностроения. НАН Беларуси
Материал поступил 20.04.2011

**Z. S. Salbieva, M. S. Lukyanov,
I. S. Sazonov, P. A. Amelchenko**
**Change of frequency characteristics of swing
sensor of stabilization of hillside tractor wreck**

The analysis of change of frequency characteristics of fluctuations of pendulum - sensor of the stabilization system of the hillside wheeled tractor wreck at the different kinematics parameters of the sustained movement of the axle of pendulum suspension is given in the work. On the basis of the analysis of results of theoretical research estimation of information content of sensor is given that let use it in the automatic system of stabilization of hillside tractor wreck at moving the machine on flat surface.

УДК 629.3

В. П. Тарасик, д-р техн. наук, проф., С. А. Рынкевич, канд. техн. наук, доц.

МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ АВТОМОБИЛЯ НА РЕЖИМЕ ГНОСТИЧЕСКОГО ПРОБЕГА

Рассмотрен метод бортового диагностирования, обеспечивающий решение проблемы оперативной оценки технического состояния гидромеханической трансмиссии грузового автомобиля на основе гностического пробега в режиме реального времени. Даны методики проведения испытательных гностических пробегов для грузовых автомобилей, оснащенных двигателями с электронным управлением, и для автомобилей с обычными дизельными двигателями. Показано, что в первом случае потенциальные возможности бортового диагностирования используются наиболее полностью. Приведены основные и наиболее важные результаты, полученные при решении проблемы диагностики трансмиссий мобильных машин.

Гидромеханические передачи (ГМП) современных автомобилей снабжены электронными системами автоматического управления. Электронный блок реализует программу алгоритма автоматического управления переключением передач и блокированием гидротрансформатора (ГДТ), а также производит диагностирование состояния исполнительных механизмов, осуществляющих управление ГМП. Потенциальные возможности электронного блока огромны, поэтому целесообразно с его помощью организовывать сбор и обработку информации о режимах работы механизмов и систем автомобиля в процессе гностических (познавательных) пробегов [1–3].

Для грузовых автомобилей, тракторов, комбайнов и дорожной техники, оснащенных двигателями с электронным управлением, предусмотрен стандарт J1939 – протокол обмена данными, причем для передачи данных по этому протоколу используется шина CAN [4]. Международным стандартом SAE J1939 специально для автомобильной диагностики разработан комплекс требований для построения диагностических электронных систем, а также базовая нотация и синтаксис используемых языков, позволяющих реализовывать программные коды для программирования мик-

роконтроллеров. Структурная схема системы автоматизированного диагностирования, входящей в состав комплексной бортовой электронной системы управления ГМП мобильной машины, приведена на рис. 1. Такая система является интеллектуальной системой управления и диагностирования (ИСУД) [4]. ИСУД ГМП включает электронный блок 4, осуществляя управление, контроль и диагностирование ГМП 2 на основе сигналов датчиков посредством подсистемы сбора и обработки информации 3. ИСУД ГМП может комплектоваться электронным блоком 5 для диагностирования двигателя 1. Контроллер электронного блока 4 реализует интеллектуальные технологии получения технического диагноза, выводя результаты определения ТС на дисплей 6 с использованием результатов анализа экспертной подсистемы 7. Все блоки ИСУД объединены между собой интеллектуальными каналами передачи информации 8 на основе протокола CAN.

Испытательные гностические пробеги могут проводиться как на грузовых автомобилях, оснащенных двигателями с электронным управлением, так и на автомобилях с обычными дизельными двигателями типа ЯМЗ. Естественно, в первом случае потенциальные возможности бортового диагностирования ис-

пользуются наиболее полно.

пробегов следующие.

Условия проведения гностических

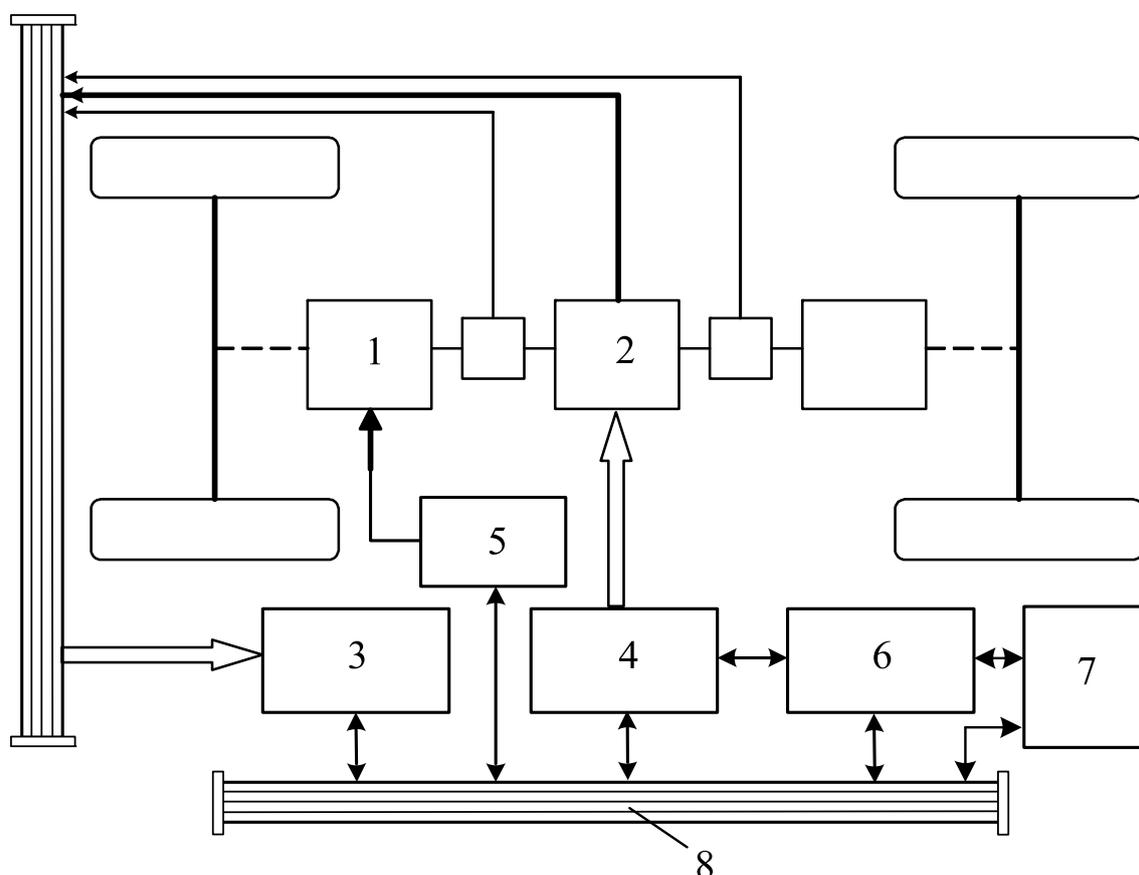


Рис. 1. Схема системы автоматизированного диагностирования с использованием CAN-шины

Диагностика ГМП на режиме гностического пробега автомобиля производится на горизонтальном участке дороги с твердым покрытием в сухую безветренную погоду. Автомобиль разгоняют до максимальной скорости при полной подаче топлива в двигатель. До проведения сеанса диагностирования двигатель и механизмы трансмиссии должны быть прогреты до нормальной эксплуатационной температуры.

Рассмотрим процесс выполнения диагностики ГМП для автомобилей, не оборудованных двигателями с электронным управлением.

В [1–3] приведены методики экспериментального определения параметров и характеристик автомобиля.

Предварительно по методикам, изложенным в [1–3], определяют значения приведенной массы автомобиля $m_{пр}$, коэффициента сопротивления качению f и коэффициента сопротивления воздуха k_w на испытательном участке. При известных значениях приведенной массы $m_{пр}$, коэффициента сопротивления качению f и коэффициента сопротивления воздуха k_w можно определить характеристику момента двигателя $M_d = f(n_d)$, передаваемого в трансмиссию. Эта задача решается в процессе гностического пробега следующим образом. Осуществляется разгон автомобиля (снаряженного или с фиксированной нагрузкой) на одной из промежуточных передач

при заблокированном ГДТ, фиксируются значения скорости v_i и ускорения a_i при заданных значениях частоты вращения вала двигателя n_{di} в желаемом диапазоне изменения n_d . Значения n_{di} принимаются с постоянным шагом Δn_d . Максимальное значение $n_{d\max}$ принимается равным n_p^* (т. е. при максимальной мощности двигателя $P_{e\max}^*$), а минимальное $n_{d\min}$ можно принять равным минимальной частоте вращения турбины, при которой блокируется ГДТ. Если необходимо расширить диапазон изменения аргумента характеристики $M_d = f(n_d)$, то ГДТ следует заблокировать вручную. В этом случае $n_{d\min}$ выбирается из условий устойчивой работы двигателя при разгоне. Значения вращающего момента двигателя M_{di} и вращающего момента ΔM_{ei} , затрачиваемого на привод вспомогательного оборудования, вычисляются при фиксированных в процессе эксперимента значениях v_i и a_i по формулам:

$$M_{di} = \frac{(m_{пр} a_i + m_a g f_i + k_w A_d v_i^2) r_k}{u_{трj} \eta_{трj}}; \quad (1)$$

$$\Delta M_{ei} = M_{ei} - M_{di}. \quad (2)$$

Значения f_i вычисляются по методике, изложенной в [1–3], а значения M_{ei} – по уравнению регрессии эталонной характеристики $M_e = f(n_d)$. Полученная характеристика $\Delta M_e = f(n_d)$ позволяет оценить суммарные затраты мощности на привод вспомогательного оборудования двигателя с учетом снижения мощности двигателя в процессе эксплуатации автомобиля. Мощность ΔP_{ei} , кВт, вычисляется по формуле

$$\Delta P_{ei} = \pi \Delta M_{ei} n_{di} / 30000. \quad (3)$$

Полученные значения M_{di} , ΔM_{ei} , ΔP_{ei} сохраняются в базе данных электронного блока управления. На основа-

нии этих данных осуществляется построение регрессий $M_d = f(n_d)$, $\Delta M_e = f(n_d)$, $\Delta P_e = f(n_d)$, и их параметры будут также храниться в базе данных. Определяя значения M_{di} , ΔM_{ei} , ΔP_{ei} и сравнивая их с информацией о параметрах, полученных в предыдущих сеансах гностического пробега, можно судить об изменении технического состояния двигателя и трансмиссии, т. е. осуществлять комплексное диагностирование этих механизмов.

Полученная характеристика $M_d = f(n_d)$ позволяет определить безразмерные характеристики ГДТ $\lambda_H = f(i_{тн})$ и $K_{тн} = f(i_{тн})$. Эта процедура осуществляется следующим образом.

Непосредственно перед испытаниями прогревают двигатель и механизмы трансмиссии для обеспечения номинальных тепловых режимов и отключают систему автоматического блокирования ГДТ. При заторможенном автомобиле включают высшую передачу в ГМП, дают полную подачу топлива в двигатель и включают аппаратуру измерения параметров. Затем отпускают педаль тормоза и осуществляют разгон снаряженного автомобиля до максимальной скорости, фиксируя параметры n_{dj} , n_{tj} , v_j , a_j при заданном шаге Δn_T изменения частоты вращения турбины ГДТ n_T . Минимальное значение $n_{T\min} = 0$, а максимальное $n_{T\max}$ принимается равным примерно $(0,85 \dots 0,9) n_p^*$ или соответствующим достигнутой максимальной скорости разгона v_{\max} .

В программе алгоритма определения характеристик ГДТ на каждом j -м шаге итераций осуществляются следующие вычисления:

$$i_{тнj} = n_{тj} u_{сп} / n_{dj}; \quad (4)$$

$$M_{тi} = \frac{(m_{пр} a_j + m_a g f_j + k_w A_{л} v_j^2) r_k}{u_{тр} \eta_{тр}}; \quad (5)$$

$$K_{тHj} = M_{Tj} / (M_{дj} u_{сп} \eta_{сп}); \quad (6)$$

$$\lambda_{Hj} = 900 M_{дj} u_{сп}^3 \eta_{сп} / (\pi^2 \rho n_{дj}^2 D_a^5), \quad (7)$$

где $i_{тн}$ – передаточное отношение ГДТ; M_T – момент на турбине, Н·м; $K_{тн}$ – коэффициент трансформации момента;

λ_H – коэффициент момента насосного колеса; ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³; D_a – активный диаметр ГДТ, м; $u_{сп}, \eta_{сп}$ – передаточное число и КПД согласующей передачи.

Для реализации методики в электронном блоке бортовой системы диагностирования разработан алгоритм, который приведен на рис. 2.

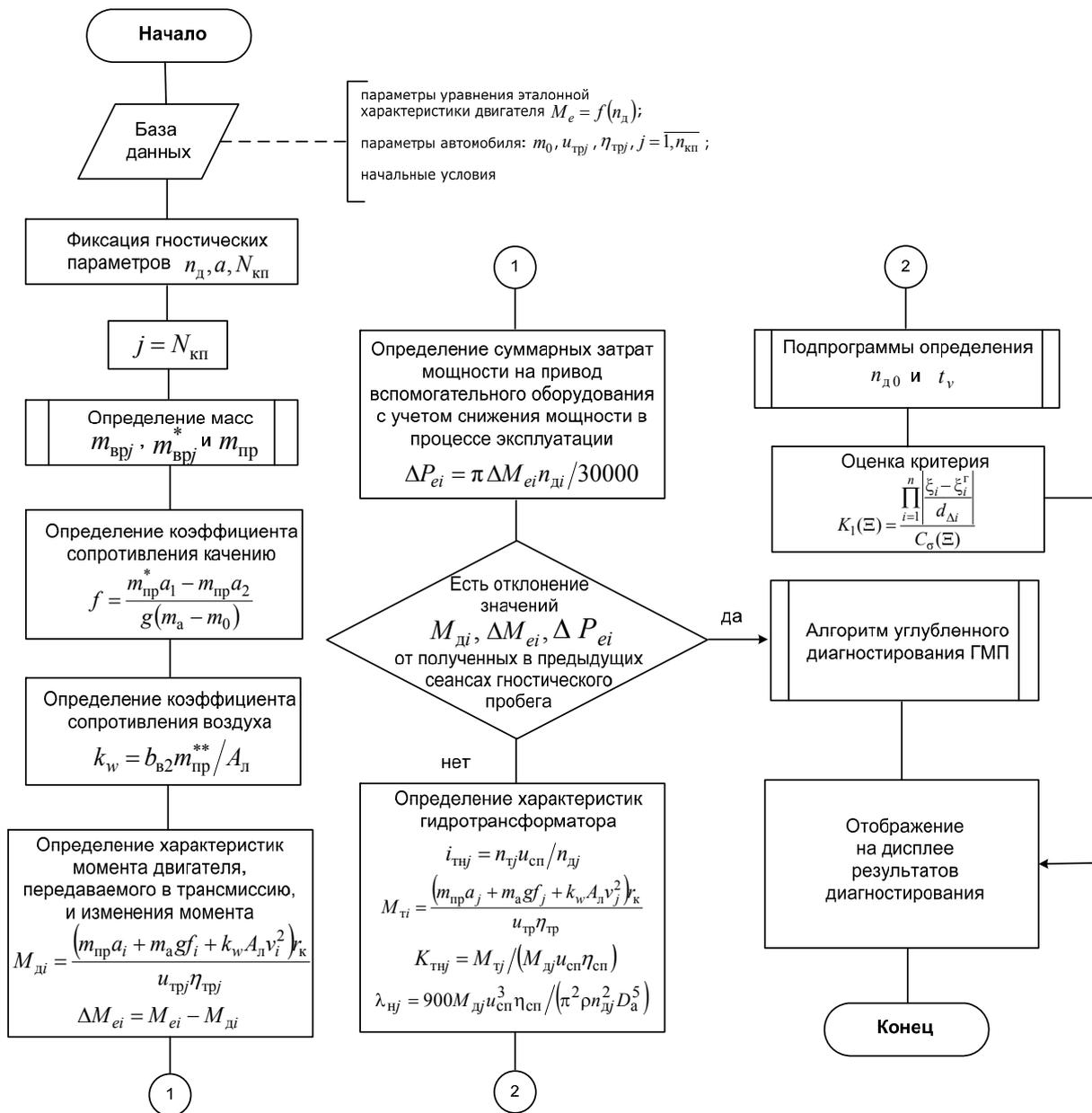


Рис. 2. Алгоритм диагностирования ГМП на основе гностического пробега

Применительно к сложным объектам, т. е. ГМП мобильных машин, техническое состояние которых оценивается несколькими диагностическими параметрами $\vec{\Xi}_{\Delta} = (\xi_1, \xi_i, \dots, \xi_r)$, для определения уровня работоспособности (параметрической пригодности) и его использования в алгоритмах системы диагностирования предложено использовать обобщенный критерий $K_1(\Xi)$ [4]:

$$K_1(\Xi) = \frac{\prod_{i=1}^n \left| \frac{\xi_i - \xi_i^r}{d_{\Delta i}} \right|}{C_{\sigma}(\Xi)}, \quad (8)$$

где $d_{\Delta i}$ – допуск (область работоспособности) на i -й диагностический параметр.

При этом

$$C_{\sigma}(\Xi) = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i \left| \frac{\xi_i - \xi_i^r}{d_{\Delta i}} \right|^2}. \quad (9)$$

Таким образом, $K_1(\Xi)$ при изменении диагностических параметров будет изменяться в пределах $[K_{\max}, 0]$, позволяя оценивать уровень параметрической работоспособности ГМП.

Для оперативного диагностирования и мониторинга технического состояния автомобиля, оснащенного ГМП, целесообразно неразрушающим методом встроенными средствами бортовой микроэлектроники осуществлять периодическую оценку частоты вращения вала двигателя на стоповом режиме ГДТ $n_{до}$ и оценку времени разгона машины до заданной скорости при заданном пути t_v . Показатель t_v определяется по регламентированной стандартом методике. Рассчитанное по формуле (8) отклонение значений показателей $n_{до}$ и t_v от эталонных для определенных однозначных условий будет характеризовать уровень работоспособности ГМП в целом.

Для оперативной проверки значе-

ния частоты вращения вала двигателя $n_{до}$ на стоповом режиме гидротрансформатора рекомендуется следующий алгоритм:

– исходное состояние: включен стояночный тормоз; педаль акселератора свободна; температура рабочей жидкости $40 \dots 60$ °С;

– включают рабочий тормоз и удерживают самосвал в неподвижном состоянии в течение всего времени диагностирования;

– на командном (ручном) режиме управления «С» устанавливают рычаг селектора в положение 6-й передачи; при этом пиктограммы на экране дисплея высвечивают значения «С» и «6»;

– постепенно увеличивая нажатие педали акселератора, доводят его до максимального значения в течение $10 \dots 15$ с;

– после достижения установившейся частоты вращения вала двигателя $n_{до}$ фиксируется его значение по тахометру на экране дисплея.

Полученное значение $n_{до}$ должно быть в пределах (1650 ± 25) об/мин (это значение соответствует двигателю с электронным управлением QSK19-C750 и гидротрансформатору ЛГ-470ПП).

Отклонение значения $n_{до}$ от заданных свидетельствует о наличии в ГМП неисправностей и необходимости в углубленной поэлементной диагностике. Для оценки величины отклонения предложено использовать формулу (8).

Данный метод предназначен для реализации в процессе оперативной диагностики ГМП карьерных самосвалов БелАЗ грузоподъемностью $45 \dots 60$ т.

Выводы

Полученные в процессе гностических пробегов данные позволяют оперативно определять техническое состояние ГМП автомобиля без использования трудоемкой планово-предупредительной экспертизы, обеспечивая снижение материальных затрат, повышение эффек-

тивности использования и технического уровня мобильных машин.

Проведенные исследования послужили основой для реализации высокоэффективных прикладных разработок и обеспечения высокого технического уровня и конкурентоспособности создаваемых мобильных машин и их механизмов. Были разработаны новые методы диагностирования ГМП, базирующиеся на новых технологиях представления и анализа информации, реализация которых обеспечила решение проблемы оперативного определения технического состояния ГМП и прогнозирования остаточного ресурса ее элементов, что повысило эффективность эксплуатации автомобилей путем сокращения затрат на обслуживание и ремонт и предотвращение аварийных ситуаций, приводящих к разрушению конструкции. Значительная часть результатов исследований приведена в [4–6].

При подготовке рукописи докторской диссертации докторантом С. А. Рынкевичем с учетом [4–6] сделаны следующие выводы.

1. Разработан новый подход комплексного определения технического состояния гидромеханической трансмиссии, т. е. ее диагностирования, в основу которого положены принципы декомпозиции и иерархичности, новые методы сбора и представления информации, методы корреляционного, регрессионного и статистического анализа, нечеткой логики, нейросетевого моделирования, экспертные и инструментальные методы. Данный подход позволил создать высокоэффективную систему диагностирования ГМП, обеспечивающую оценку фактического технического состояния ГМП, определение ее остаточного ресурса, исключение выхода диагностических параметров за пределы допустимых значений и прогнозирование вероятности возникновения отказов и неисправностей, а также значительное (до 40...50 %) увеличение ресурса механизмов и деталей транс-

миссии.

2. Разработана стратегия обнаружения и локализации неисправностей ГМП путем неразрушающего анализа на режиме движения автомобиля и оперативной идентификации, позволяющая определять причину, местоположение и динамику изменения отказов без использования планово-предупредительной экспертизы, обеспечивая снижение материальных затрат, повышение эффективности диагностики и достижение высокого технического уровня мобильных машин.

3. Разработана новая стратегия оперативного диагностирования ГМП на основе системного подхода и многоуровневой фрагментации объекта, отличающаяся одновременным использованием в качестве первичной информации совокупности кинематических и гидравлических параметров, параметров тепловых процессов, причем диагностические параметры верхнего иерархического уровня являются критериями оценки предельного состояния более нижнего уровня, обеспечивающая сокращение затрат на обслуживание и ремонт и предотвращение аварийных ситуаций, приводящих к разрушению конструкции.

4. Разработана методика выбора диагностических параметров и критериев оценки предельного состояния ГМП. Предложен ряд критериев выбора диагностических параметров: критерий стабильности, оцениваемый по коэффициенту вариации; критерий трендовости, характеризующий однозначность поведения параметра в процессе наработки автомобиля; критерий чувствительности, характеризующий скорость приращения показателя оценки технического состояния при достаточно малом изменении диагностического параметра. Причем при выборе необходимых диагностических параметров связь между ними необходимо оценивать по величине коэффициента парной корреляции.

5. Выявлены предельные состояния ГМП, к которым относятся состояния параметрической, трибологической, гидравлической непригодности и полной реализации объектом заданных функций, т. е. явление насыщения. Разработан базовый модуль оценки работоспособности ГМП, который выделяет минимальную структурную единицу диагностируемого объекта (деталь, сопряжение, механизм, машину в целом) и позволяет установить используемые для оценки работоспособности диагностические параметры и выходные показатели (критерии). Для анализа технического состояния предложено сложный объект представлять в виде пяти уровней: элементного, трибометрического, компонентного, морфологического и комплексного, – на каждом из которых используются базовые модули со своим набором входных параметров и оценочных показателей.

6. Получены математические зависимости, характеризующие поведение показателей оценки работоспособности и закономерности изменения значений диагностических параметров в условиях функционирования ГМП. Выявлены взаимозависимости между диагностическими параметрами и показателями оценки работоспособности ГМП, зависимости характеристик переходных процессов гидравлического привода ГМП от величин давлений и расходов в гидравлических магистралях, физических свойств рабочей жидкости, а также впервые обнаружены закономерности поведения диагностических параметров во времени и в отношении друг друга, демонстрирующие характер неисправностей и динамику отказов, что позволяет эффективно использовать их в алгоритмах системы диагностирования для результативной постановки технического диагноза. Выявлено, что параметры управления фрикционами ГМП

оказывают значительное влияние на триботехнические характеристики и тепловую нагруженность фрикционных дисков. Получено математическое описание, использование которого в бортовом диагностировании позволяет прогнозировать износ фрикционных дисков и величину их остаточного ресурса.

7. Разработана методика оценки работоспособности ГМП, основанная на расширенном комплексе оценочных критериев; ее реализация обеспечивает всесторонний анализ физических свойств ГМП и эффективный контроль изменения диагностических параметров, предотвращая переход их значений за границы предельно допустимых. Выявленные допустимые и предельные значения диагностических параметров, переход за границы которых приводит к появлению отказов ГМП, служат практической рекомендацией для эксплуатирующих организаций при регламентации норм оценки технического состояния ГМП мобильных машин, что позволяет в эксплуатационных условиях прогнозировать техническое состояние и повышает эффективность использования мобильных машин, снижает длительность простоев и технического обслуживания и увеличивает продолжительность межремонтного периода.

8. Впервые разработан метод анализа износа фрикционных дисков на основе организации специальных тестовых заездов в стандартных однозначных дорожных условиях с целью измерения параметров буксования фрикционных дисков при переключении передач и их сравнения с эталонными (предельно допустимыми) значениями. Данный метод предусматривает организацию серии специальных тестовых заездов в стандартных однозначных дорожных условиях на основе измерения длительности t заполнения гидроцилиндра фрикциона по первой пульсации давления при пе-

реключении передач и сравнения значения τ с эталонным предельно допустимым значением. Отсутствие необходимости в демонтаже ГМП обеспечивает существенное снижение затрат на ремонт и обслуживание ГМП и сокращает длительность простоев автосамосвалов на линии.

9. Разработан метод распознавания неисправностей и вывода технического диагноза в вербальном виде путем приведения диагностических параметров различной физической природы к единому безразмерному виду на основе описания их функциями принадлежности и методики нейронечеткой идентификации, позволяющей осуществлять декодирование и лингвистическое преобразование совокупности параметров, обеспечивающий устранение неопределенностей при функционировании объектов с не полностью детерминированными условиями и повышение достоверности получения технического диагноза в режиме реального времени. Разработан метод прогнозирования, основанный на выявлении единых регулярных устойчивых закономерностей изменения параметров оценки технического состояния одного или группы однотипных объектов с использованием критериев устойчивого уменьшения среднего квадратического отклонения для группы объектов, монотонности и стабильности кривизны линии тренда, реализация которого обеспечивает повышение быстродействия и точности определения остаточного ресурса ГМП. Реализация метода трендового прогнозирования позволяет в режиме реального времени предотвращать отказы ГМП, выявлять состояние работоспособности ГМП в целом и ее элементов, обеспечивать долгосрочную оценку ее технического состояния и определять остаточный ресурс.

10. Синтезированы алгоритмы определения технического состояния на основе поэлементного диагностирования ГМП мобильных машин, использующие интеллектуальные методы обработки и анализа информации. Реализация алгоритмов для автомобилей-самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 45...60 т обеспечивает в режиме реального времени оперативную оценку работоспособности и эффективное определение технического состояния, повышение эксплуатационной безопасности, на 20...25 % увеличение интервала между техническими обслуживаниями и ремонтами машины, а также на 10...15 % сокращение затрат на обслуживание и повышение коэффициента технической готовности в 1,2...1,3 раза. Предложенные новые системы диагностирования ГМП грузовых автомобилей и гусеничных мобильных машин, которые внедрены на предприятиях автомобиле- и тракторостроения (ОАО БелАЗ, филиал МАЗ ОАО «Могилевтрансмаш» и Минский тракторный завод) и апробированы в автохозяйствах и на горно-обогатительных предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации, позволяют существенно повысить показатели эффективности машин и качества процессов функционирования ГМП, увеличить безопасность эксплуатации, повысить на 35...40 % ресурс машины и на 45...50 % ресурс трансмиссии, обеспечить высокую эффективность диагностирования в эксплуатационных условиях машин и определения их остаточного ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасик, В. П.** Адаптация параметров алгоритма автоматического управления ГМП к параметрам автомобиля / В. П. Тарасик, И. М. Дычкин, А. Н. Егоров // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 9. – С. 22–24.

2. **Тарасик, В. П.** Адаптация параметров алгоритма автоматического управления ГМП к параметрам автомобиля / В. П. Тарасик, И. М. Дычкин, А. Н. Егоров // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 11. – С. 16–18.

3. **Тарасик, В. П.** Теория движения автомобиля / В. П. Тарасик. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 478 с. : ил.

4. Диагностирование гидромеханических передач мобильных машин / Н. Н. Горбатенко [и др.] ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. П. Тарасика. – Могилев : Белорус.-Рос.

ун-т, 2010. – 511 с. : ил.

5. **Тарасик, В. П.** Технологии искусственного интеллекта в диагностировании автотранспортных средств / В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – 280 с. : ил.

6. **Рынкевич, С. А.** Новые технологии и проблемы науки на транспорте / С. А. Рынкевич. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 337 с.: ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 16.03.2011

V. P. Tarasik, S. A. Rynkevich
The method of operative diagnostic
of the hydromechanical transmission
of the track on mode of the cognitive
run motion

The considered method on-board diagnostic, providing decision of the problem of operative of the estimation of the technical condition hydromechanical transmission of the dump truck BELAZ-7555 on base on mode of the cognitive run motion on mode of the real-time. Methodists of the undertaking test of the cognitive run motion are given for of the dump truck, equipped engine with electronic control, and for of the dump truck with usual diesel engine. It is shown that in the first event potential possibilities on-board diagnostic is used most completely. They are brought main and the most important results, got at decision of the problem of the diagnostics transmission of the dump truck and mobile machines.

УДК 621.833

С. Н. Хатетовский, канд. техн. наук, доц., П. Н. Громыко, д-р техн. наук, проф.,
М. С. Павлович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЦЕВОЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ К ПОГРЕШНОСТЯМ МОНТАЖА

В статье приводится сравнительный анализ чувствительности цевочных передач с параллельными и пересекающимися осями к погрешностям монтажа. Исследования проведены как численным методом, так и при помощи твердотельного моделирования. Передаточное отношение зубчатой передачи рассматривается как отношение момента общей нормали к контактирующим поверхностям относительно оси вращения ведомого колеса к моменту этой нормали относительно оси вращения ведущего колеса.

Введение

Зубчатые передачи, нечувствительные к погрешностям монтажа, широко применяются в самых различных сферах техники. Эти передачи обеспечивают постоянство, по крайней мере, передаточного отношения при возникновении погрешностей относительного положения осей вращений колес как при сборочных операциях (погрешности монтажа), так и в процессе эксплуатации. Одной из таких передач является эвольвентная передача. Очевидно, что зубчатые передачи, нечувствительные к погрешностям монтажа, – привлекательное решение для инженера. Однако они не всегда могут быть использованы, т. к. не всегда обладают требуемыми характеристиками. Например, если необходимо обеспечить большое передаточное отношение, то инженеру часто приходится применять эксцентриковую передачу с разницей в один зуб между числами зубьев центрального колеса и сателлита. Спроектировать такую зубчатую передачу на основе эвольвентного зацепления проблематично, поэтому приходится применять цевочное зацепление, хотя известно, что оно чувствительно к погрешностям монтажа, т. е. при отклонении межосевого расстояния от теоретически точного значения передаточное отношение становится зависимым от относительного положения

зубчатых колес. В настоящее время, чтобы минимизировать чувствительность цевочной передачи к погрешностям монтажа, приходится прибегать к дорогостоящим методам обработки зубьев, а также повышать точность сборки. В итоге все эти меры приводят к удорожанию проектного решения. Однако существует и другое решение проблемы обеспечения постоянства передаточного отношения цевочной передачи, которое и рассматривается в работе.

В [1] показано, что нечувствительность зубчатой передачи к погрешностям монтажа может быть обеспечена, если для каждой контактирующей поверхности выполняется условие

$$[\vec{r}, \vec{n}_0, \vec{k}] = M, \quad (1)$$

где \vec{r} – радиус-вектор точки поверхности, проведенный из фиксированного центра, лежащего на оси вращения; \vec{n}_0 – единичная нормаль к поверхности; \vec{k} – единичный вектор оси вращения поверхности; M – конечная константа, не равная нулю.

Условие (1) позволило получить уравнения контактирующей поверхности [1]:

$$\frac{dY_0}{dt} = P_0 \cdot \frac{dX_0}{dt} + Q_0 \cdot \frac{dZ_0}{dt};$$

$$\begin{aligned}
 X_0 + Y_0 \cdot P_0 + M \cdot \sqrt{1 + P_0^2 + Q_0^2} &= 0; \\
 C_1 &= \arctg(P_0); \\
 C_2 &= Q_0 \cdot \cos(C_1); \\
 C_3 &= \frac{M \cdot C_1 \cdot C_2}{\sqrt{1 + C_2^2}} - Z_0; \\
 C_4 &= \frac{Y_0}{\cos(C_1)} + \frac{M}{\sqrt{1 + C_2^2}} \cdot ((1 + C_2^2) \cdot \tg(C_1) - C_1); \\
 p &= \tg(s + C_1); \\
 q &= \frac{C_2}{\cos(s + C_1)}; \\
 z &= -\frac{M \cdot C_2}{\sqrt{1 + C_2^2}} \cdot (s + C_1) + C_3; \\
 y &= -\frac{M}{\sqrt{1 + C_2^2}} \cdot ((1 + C_2^2) \cdot \sin(s + C_1) - \\
 &- (s + C_1) \cdot \cos(s + C_1)) + C_4 \cdot \cos(s + C_1); \\
 x &= -\frac{M}{\sqrt{1 + C_2^2}} \cdot ((1 + C_2^2) \cdot \cos(s + C_1) + \\
 &+ (s + C_1) \cdot \sin(s + C_1)) - C_4 \cdot \sin(s + C_1), \quad (2)
 \end{aligned}$$

где X_0, Y_0, Z_0 – уравнения кривой, через которую проходит поверхность, $X_0 = X_0(t), Y_0 = Y_0(t), Z_0 = Z_0(t)$; s и t – независимые параметры.

Одной из контактирующих поверхностей в цевочной передаче является поверхность цевки. Следовательно, для обеспечения нечувствительности цевочной передачи к погрешностям монтажа она должна описываться уравнениями (2). Если положить $Z_0 = 0$, то уравнения $X_0 = X_0(t), Y_0 = Y_0(t)$ должны описывать плоскую кривую, через которую проходит контактирующая поверхность цевки – окружность. При этом сама поверхность цевки получается достаточно сложной, чтобы ее можно было изготовить и реально использовать в цевочной передаче. Поэтому описанный в [1] способ обеспечения нечув-

ствительности цевочной передачи к погрешностям монтажа на практике вряд ли применим.

Однако поставленная цель может быть достигнута, если принять следующую гипотезу: передаточное отношение цевочной передачи, состоящей из цилиндрических цевок, и шестерни, оси вращения которых пересекаются, при возникновении погрешностей монтажа изменяется меньше, чем передаточное отношение цевочной передачи с параллельными осями вращения.

Для проверки гипотезы были разработаны математические и твердотельные модели цилиндрической (оси вращения цевок и шестерни параллельны) и конической (оси вращения цевок и шестерни пересекаются) цевочных передач.

Математические модели. Для дальнейших рассуждений введем следующие системы координат (рис. 1 и 2): $Oxyz$ – неподвижная система, ось Oz которой совпадает с осью $O_1z^{(1)}$ вращения цевок; $O_1x^{(1)}y^{(1)}z^{(1)}$ – подвижная система, жестко связанная с цевками; $O_Hx^{(H)}y^{(H)}z^{(H)}$ – неподвижная система, ось $O_Hz^{(H)}$ которой совпадает с осью $O_2z^{(2)}$ вращения шестерни; $O_2x^{(2)}y^{(2)}z^{(2)}$ – подвижная система, жестко связанная с шестерней.

В [2] получены уравнения цевки в системе отсчета, которая жестко связана с самой цевкой:

$$\begin{aligned}
 x_1^{(1)} &= r_C - \rho \cdot \cos(\theta); \\
 y_1^{(1)} &= \rho \cdot \sin(\theta); \\
 z_1^{(1)} &= 0, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где θ – полярный угол; ρ – полярный радиус (радиус цевки); r_C – радиус окружности, на которой расположены цевки.

Проекция нормали в системе $O_1x^{(1)}y^{(1)}z^{(1)}$:

$$\begin{aligned} n_{1x}^{(1)} &= -\cos(\theta); \\ n_{1y}^{(1)} &= \sin(\theta); \\ n_{1z}^{(1)} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Параметры θ и $\rho = const$ определяют точку контакта при некотором угле φ_1 поворота цевки в передаче, собранной без погрешностей.

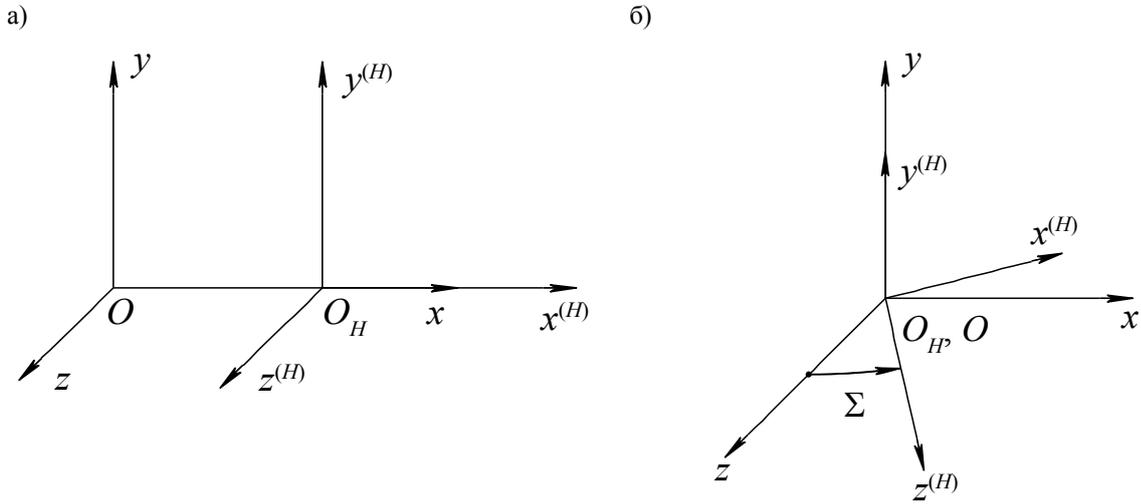


Рис. 1. Неподвижные системы отсчета: а – системы отсчета цевочной передачи с параллельными осями; б – системы отсчета цевочной передачи с пересекающимися осями

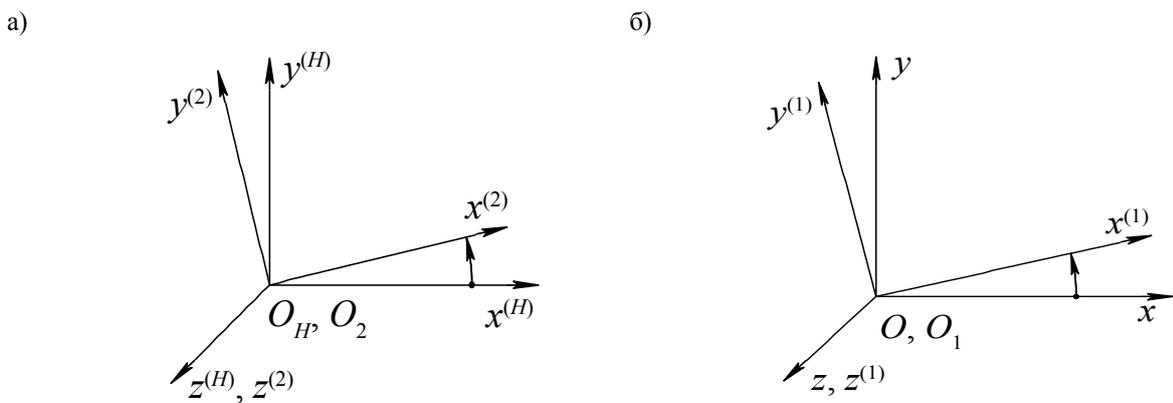


Рис. 2. Подвижные системы отсчета: а – система отсчета, жестко связанная с шестерней; б – система отсчета, жестко связанная с цевками

Аналогично опишем реальную поверхность цевки, т. е. цевки реальной передачи, собранной с погрешностями:

$$\begin{aligned} x_{1r}^{(1)} &= r_c - \rho_r \cdot \cos(\theta_r); \\ y_{1r}^{(1)} &= \rho_r \cdot \sin(\theta_r); \\ z_{1r}^{(1)} &= 0; \\ n_{1xr}^{(1)} &= -\cos(\theta_r); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} n_{1yr}^{(1)} &= \sin(\theta_r); \\ n_{1zr}^{(1)} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Параметры θ_r и $\rho_r = const$ определяют точку контакта при некотором угле ϕ_{1r} поворота цевки в передаче, собранной с погрешностями. Считаем, что в общем случае $\rho \neq \rho_r$.

Для дальнейших рассуждений векторы $\vec{r}_1(x_1^{(1)}, y_1^{(1)}, z_1^{(1)})$, $\vec{n}_1(n_{1x}^{(1)}, n_{1y}^{(1)}, n_{1z}^{(1)})$, $\vec{r}_{1r}(x_{1r}^{(1)}, y_{1r}^{(1)}, z_{1r}^{(1)})$, $\vec{n}_{1r}(n_{1xr}^{(1)}, n_{1yr}^{(1)}, n_{1zr}^{(1)})$ представим в виде соответствующих матриц:

$$R_1^{(1)} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} \\ y_1^{(1)} \\ z_1^{(1)} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$N_1^{(1)} = \begin{bmatrix} n_{1x}^{(1)} \\ n_{1y}^{(1)} \\ n_{1z}^{(1)} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$R_{1r}^{(1)} = \begin{bmatrix} x_{1r}^{(1)} \\ y_{1r}^{(1)} \\ z_{1r}^{(1)} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$N_{1r}^{(1)} = \begin{bmatrix} n_{1xr}^{(1)} \\ n_{1yr}^{(1)} \\ n_{1zr}^{(1)} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Координаты контактной точки, лежащей на поверхности зуба идеальной шестерни, в системе координат $O_2x^{(2)}y^{(2)}z^{(2)}$, жестко связанной с самой шестерней, представим следующим образом:

$$R_2^{(2)} = M_{2H} \times M_{H0} \times M_{01} \times R_1^{(1)}, \quad (11)$$

где M_{2H} – матрица перехода от неподвижной системы координат

$O_Hx^{(H)}y^{(H)}z^{(H)}$ к системе $O_2x^{(2)}y^{(2)}z^{(2)}$; M_{H0} – матрица перехода от неподвижной системы координат $Oxyz$ к системе координат $O_Hx^{(H)}y^{(H)}z^{(H)}$; M_{01} – матрица перехода от системы $O_1x^{(1)}y^{(1)}z^{(1)}$, жестко связанной с цевками, к системе $Oxyz$.

Аналогично определим в системе $O_2x^{(2)}y^{(2)}z^{(2)}$ компоненты нормали \vec{n}_2 к поверхности зуба идеальной шестерни в рассматриваемой контактной точке, приняв во внимание очевидное равенство $N_2^{(2)} = N_1^{(2)}$:

$$N_2^{(2)} = M_{2H} \times M_{H0} \times M_{01} \times N_1^{(1)}. \quad (12)$$

Переходя к рассмотрению реальной передачи, получим в системе $Oxyz$ координаты точки рабочей поверхности реальной цевки:

$$R_{1r} = M_{01r} \times R_{1r}^{(1)}, \quad (13)$$

где M_{01r} – матрица перехода от системы $O_1x^{(1)}y^{(1)}z^{(1)}$ к системе $Oxyz$ с учетом реального угла поворота ϕ_{1r} .

Аналогично определяем в системе $Oxyz$ компоненты нормали к рабочей поверхности реальной цевки в рассматриваемой точке:

$$N_{1r} = M_{01r} \times N_{1r}^{(1)}. \quad (14)$$

Определяем также в системе $Oxyz$ координаты точки рабочей поверхности зуба реальной шестерни и компоненты соответствующей нормали:

$$R_{2r} = M_{0Hr} \times M_{H2r} \times R_2^{(2)}; \quad (15)$$

$$N_{2r} = M_{0Hr} \times M_{H2r} \times N_2^{(2)}, \quad (16)$$

где M_{0Hr} – матрица перехода от системы координат $O_Hx^{(H)}y^{(H)}z^{(H)}$ к системе $Oxyz$ с учетом рассматриваемых в работе погрешностей монтажа; M_{H2r} – матрица перехода от системы

$O_2x^{(2)}y^{(2)}z^{(2)}$ к системе $O_Hx^{(H)}y^{(H)}z^{(H)}$ с учетом реального угла поворота φ_{2r} шестерни в передаче, собранной с погрешностями.

Для обеих передач (как с параллельными, так и с пересекающимися осями) матрицы M_{01} , M_{2H} , M_{01r} и M_{H2r} имеют следующий вид:

$$M_{01} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (17)$$

$$M_{2H} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_2) & \sin(\varphi_2) & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (18)$$

$$M_{01r} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{1r}) & -\sin(\varphi_{1r}) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi_{1r}) & \cos(\varphi_{1r}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (19)$$

$$M_{H2r} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{2r}) & -\sin(\varphi_{2r}) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi_{2r}) & \cos(\varphi_{2r}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где φ_2 – угол поворота идеальной шестерни, который определим по следующей формуле:

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1}{u_{12}}, \quad (21)$$

где u_{12} – идеальное передаточное отношение.

Если передача собрана с погрешностями и при данном значении φ_1 существует точка контакта, то должны быть справедливы следующие равенства:

$$\begin{aligned} \vec{r}_{1r} &= \vec{r}_{2r}; \\ \vec{n}_{1r} \times \vec{n}_{2r} &= 0, \end{aligned} \quad (22)$$

где \vec{r}_{1r} – радиус-вектор точки контакта, лежащей на рабочей поверхности реальной цевки в системе $Oxyz$; \vec{r}_{2r} – радиус-вектор точки контакта, лежащей на рабочей поверхности зуба реальной шестерни в системе $Oxyz$; \vec{n}_{1r} и \vec{n}_{2r} – соответствующие нормали, которые должны лежать на одной прямой.

Векторы $\vec{r}_{1r}(x_{1r}, y_{1r}, z_{1r})$, $\vec{r}_{2r}(x_{2r}, y_{2r}, z_{2r})$, $\vec{n}_{1r}(n_{1xr}, n_{1yr}, n_{1zr})$ и $\vec{n}_{2r}(n_{2xr}, n_{2yr}, n_{2zr})$ соответствуют следующим матрицам (см. формулы (13)...(16)):

$$R_{1r} = \begin{bmatrix} x_{1r} \\ y_{1r} \\ z_{1r} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (23)$$

$$N_{1r} = \begin{bmatrix} n_{1xr} \\ n_{1yr} \\ n_{1zr} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (24)$$

$$R_{2r} = \begin{bmatrix} x_{2r} \\ y_{2r} \\ z_{2r} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (25)$$

$$N_{2r} = \begin{bmatrix} n_{2xr} \\ n_{2yr} \\ n_{2zr} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

С учетом компонентов матриц (23)...(26) равенства (22) перепишем следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} x_{1r} - x_{2r} &= 0; \\ y_{1r} - y_{2r} &= 0; \\ z_{1r} - z_{2r} &= 0; \\ n_{1xr} \cdot n_{2yr} - n_{1yr} \cdot n_{2xr} &= 0; \\ n_{2zr} &= 0. \end{aligned} \right. \quad (27)$$

В процессе решения системы уравнений (27) определяем пять неиз-

вестных: $\varphi_1, \varphi_{1r}, \varphi_{2r}, \theta, \theta_r$, а значение угла φ_{1r} задаем.

При этом, согласно [1], реальное передаточное отношение определяем по формуле

$$u_{12r} = \frac{(\vec{r}_{2r} \times \vec{n}_{2r}) \cdot \vec{k}_{2r}}{(\vec{r}_{1r} \times \vec{n}_{1r}) \cdot \vec{k}_1}, \quad (28)$$

где \vec{k}_{2r} – единичный вектор оси вращения шестерни при наличии погрешностей сборки; \vec{k}_1 – единичный вектор оси вращения цевок.

Твердотельные модели. Для получения твердотельных моделей можно использовать одну из САД-систем, поддерживающих моделирование кинематики и механического взаимодействия моделей.

Исходные данные для моделирования цевочных передач с параллель-

ными осями (передача I) и с пересекающимися осями (передача II): радиус цевки $\rho = 5$ мм; радиус окружности, на которой находятся цевки, $r_c = 100$ мм. Для передачи I межосевое расстояние $A = 53$ мм.

Для передачи II угол пересечения осей $\Sigma = 10^\circ$, расстояние от начала координат системы $O_2x^{(2)}y^{(2)}z^{(2)}$ до ближайшего нормального сечения шестерни 302,3 мм, что примерно соответствует межосевому расстоянию 53 мм передачи I. И в одном, и в другом случае идеальное передаточное отношение $u_{12} = 0,5$.

Проектирование передачи I велось согласно [3], а передачи II – согласно [2]. Схемы полученных твердотельных моделей представлены на рис. 3.

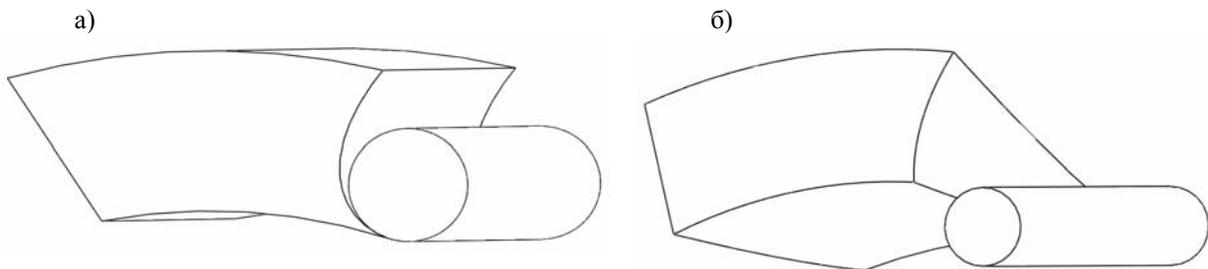


Рис. 3. Схемы твердотельных моделей: а – передача I; б – передача II

Исследования. Исследовались следующие погрешности: погрешность межосевого расстояния $\Delta A = 0,5$ мм передачи I; погрешность межосевого угла $\Delta \Sigma = 0,1^\circ$ передачи II. Данные погрешности можно считать приблизительно сопоставимыми.

Матрицы перехода между системами координат $O_Hx^{(H)}y^{(H)}z^{(H)}$ и $Oxyz$ передачи I:

$$M_{H0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -A \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (29)$$

$$M_{0Hr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A + \Delta A \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Матрицы перехода между системами координат $O_Hx^{(H)}y^{(H)}z^{(H)}$ и $Oxyz$ передачи II:

$$M_{H0} = \begin{bmatrix} \cos(\Sigma) & 0 & -\sin(\Sigma) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\Sigma) & 0 & \cos(\Sigma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (31)$$

$$M_{0Hr} = \begin{bmatrix} \cos(\Sigma + \Delta\Sigma) & 0 & \sin(\Sigma + \Delta\Sigma) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\Sigma + \Delta\Sigma) & 0 & \cos(\Sigma + \Delta\Sigma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Для передачи I

$$\vec{k}_{2r} = \vec{k}_2 = \vec{k}_1 = \vec{k}, \quad (33)$$

где \vec{k}_2, \vec{k} – единичные векторы осей $O_2z^{(2)}$ и Oz соответственно.

Для передачи II

$$\vec{k}_{2r} = \sin(\Sigma + \Delta\Sigma) \cdot \vec{i} + \vec{j} + \cos(\Sigma + \Delta\Sigma) \cdot \vec{k}; \quad (34)$$

$$\vec{k}_1 = \vec{k}, \quad (35)$$

где \vec{i}, \vec{j} – единичные векторы осей Ox и Oy соответственно.

При значениях ρ_r , равных 4,5 и 3,5 мм для передачи I и передачи II соответственно, удалось решить систему уравнений (27) численным методом. Результаты решения представлены на рис. 4 и 5.

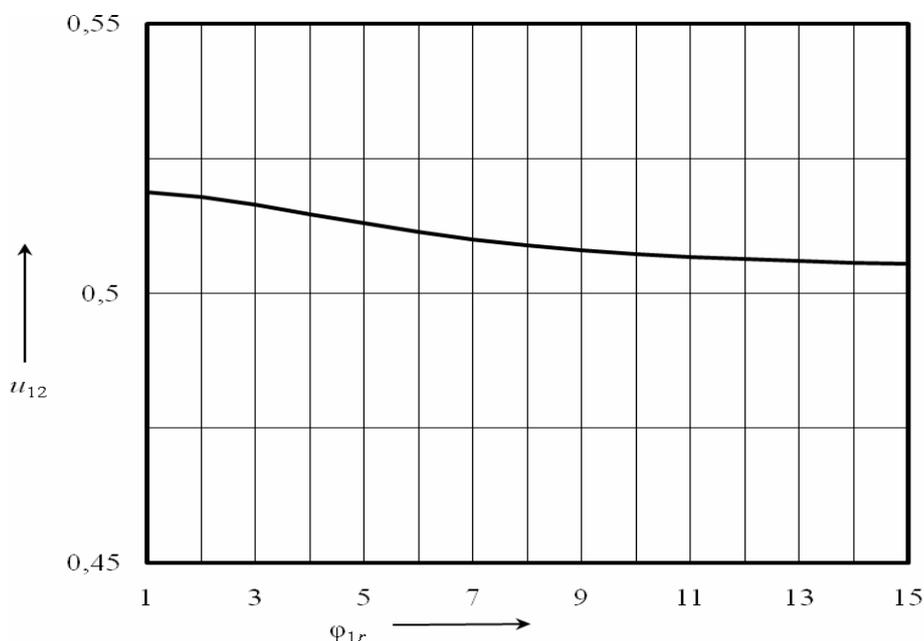


Рис. 4. График функции $u_{12} = u_{12}(\varphi_{1r})$ передачи I, полученный численным методом

Анализ вышеприведенных графиков показывает, что максимальное изменение передаточного отношения передачи I равно 0,01336833, и оно на порядок больше, чем максимальное изменение передаточного отношения передачи II, которое равно 0,00177265.

Исследования твердотельных моделей, выполненные при помощи средств САД-системы, представлены на рис. 6 и 7. На этих графиках виден разброс значений передаточного отноше-

ния, что объясняется погрешностью геометрического моделирования цевочного зацепления. Данная погрешность является из-за того, что поверхность зуба шестерни представляется в виде дискретной совокупности нормальных сечений, а каждое нормальное сечение – в виде дискретной совокупности точек, координаты которых рассчитываются по соответствующим формулам. Объединение точек в непрерывную линию осуществляется автоматически САД-системой

при помощи сплайнов. Объединение нормальных сечений в одну твердотельную модель также осуществляется САД-системой в соответствии с ее внутренними алгоритмами.

Линии тренда, построенные для

каждого из графиков, полученных при помощи средств САД-системы, соответствуют графикам, полученным при помощи численного метода решения системы уравнений (27).

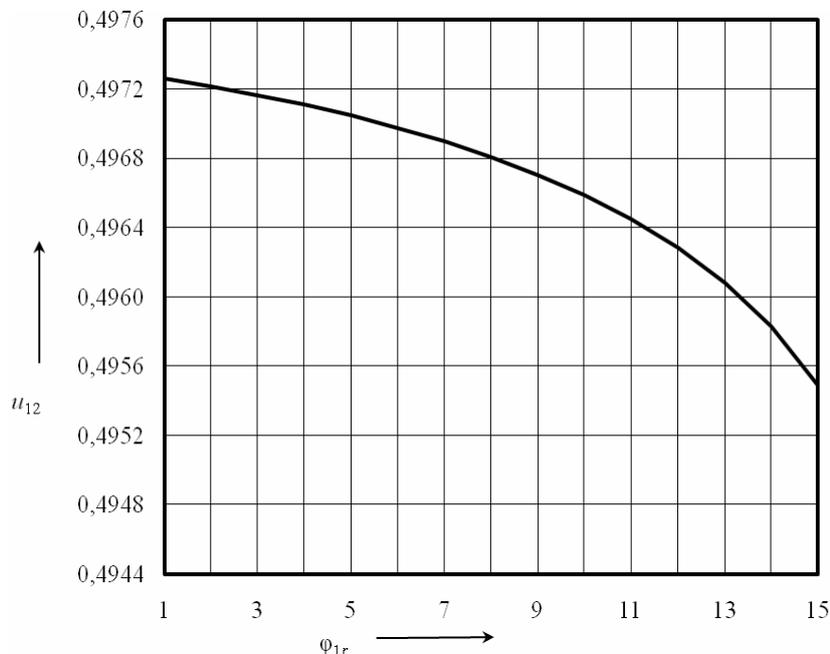


Рис. 5. График функции $u_{12} = u_{12}(\varphi_{1r})$ передачи II, полученный численным методом

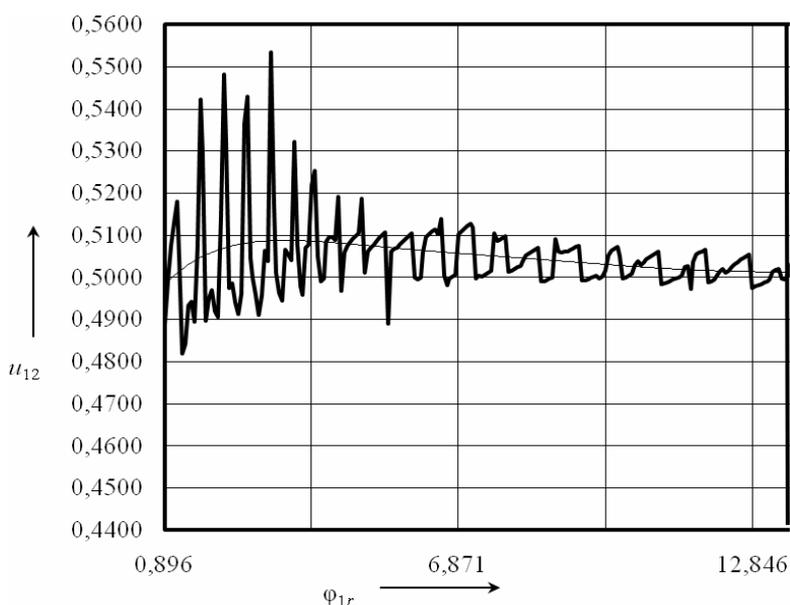


Рис. 6. График функции $u_{12} = u_{12}(\varphi_{1r})$ передачи I, полученный при помощи средств САД-системы

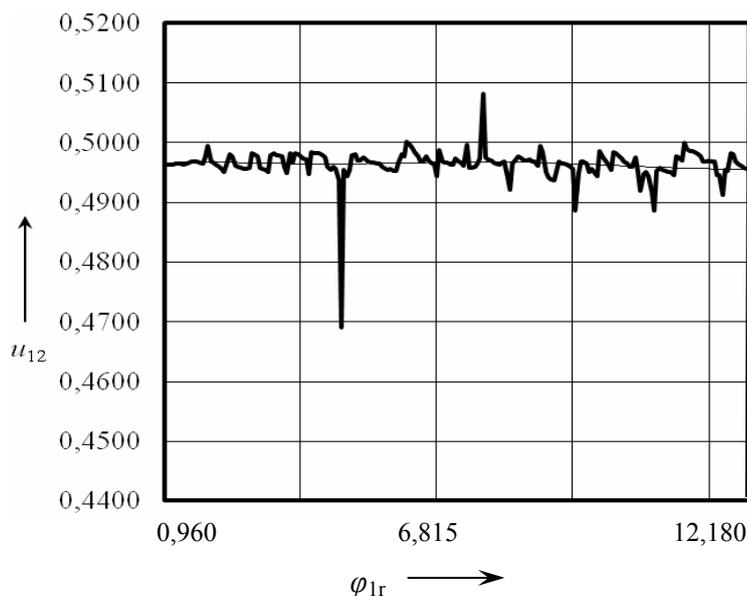


Рис. 7. График функции $u_{12} = u_{12}(\varphi_{1r})$ передачи II, полученный при помощи средств САД-системы

Заключение

Результаты исследования передаточного отношения цевочной передачи численным методом и методом твердотельного моделирования подтверждают выдвинутую гипотезу о том, что вариант передачи с пересекающимися осями может быть менее чувствителен к погрешностям монтажа, чем вариант передачи с параллельными осями.

Погрешность межосевого расстояния цевочной передачи с параллельными осями в определенных пределах не исключает контакт рабочих поверхностей в том случае, если межосевое расстояние увеличивается, а радиус используемой цевки меньше теоретически точного.

Погрешность межосевого угла це-

вочной передачи с пересекающимися осями в определенных пределах не исключает контакт рабочих поверхностей в том случае, если межосевой угол увеличивается, а радиус используемой цевки меньше теоретически точного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хатетовский, С. Н. Обеспечение нечувствительности зацепления поверхностей к изменению их относительного положения / С. Н. Хатетовский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 122–131.
2. Хатетовский, С. Н. Повышение эффективности работы аппаратов пищевых производств путем использования в их конструкции прецессионной передачи / С. Н. Хатетовский, П. Н. Громыко, К. К. Гуляев // Вестн. МГУП. – 2010. – № 1. – С. 104–112.
3. Литвин, Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф. Л. Литвин. – М.: Наука, 1968. – 584 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 10.03.2011

S. N. Khatetovsky, P. N. Gromyko,
M. S. Pavlovich
Support of pin gear insensitivity
to assembly errors

In the article comparative analysis of sensitivity to assembly errors of pin gears with parallel and intersecting axles is carried out. The research is carried out by means of numerical method and solid-body simulation. Reduction ratio of gearing is defined as ratio of moment of common normal to contacting surfaces about driven wheel rotation axle to moment of same normal about driving wheel rotation axle.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62.83.52

В. А. Селиванов, канд. техн. наук, доц.

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Рассмотрены системы автоматического управления малофазными тиристорными электроприводами. Их основной задачей является улучшение динамических характеристик, что достигается применением адаптивных регуляторов тока и скорости, а при наличии нестационарных узлов применением адаптивных устройств на уровне самонастраивающихся систем. Анализ различных методов описания систем управления электроприводами показывает перспективность методов идентификации, в которых процесс определения математического описания основан на обработке контролируемых входных и выходных сигналов.

Современные электрические приводы являются самыми сложными нелинейными системами автоматического управления. Поведение таких систем в переходных и установившихся режимах описывается эквивалентными математическими моделями в виде нелинейных дифференциальных, интегральных, разностных и алгебраических уравнений. Теоретические методы получения математического описания (модели) сложной системы электропривода встречаются зачастую непреодолимые трудности.

В действительности многие электромеханические объекты характеризуются существенной нестационарностью коэффициентов и параметров в описании движения. К таким системам относятся намагничивающие и перематничивающие устройства, момент инерции, и, соответственно, электромеханическая постоянная времени может измениться в 3...5 раз.

Параметры некоторых объектов управления с упругой механической связью (подъемники, антенны и др.) и транспортируемым упругим материалом (бумага, пленка, корд, резина и т. д.) в различных режимах могут изме-

няться в десятки раз.

Кроме вышеизложенных, имеются и другие факторы, обуславливающие изменение параметров по довольно сложным и, чаще всего, неопределенным законам. Сюда относится скачкообразное изменение параметров в токовом контуре при переходе из непрерывного режима в прерывистый и, наоборот, в контуре скорости после замены какого-либо узла или испытаний на объекте различных образцов механизмов и т. п. Такие системы описываются уравнениями движения с неопределенно-изменяющимися коэффициентами. Здесь можно установить или предположить определенными лишь пределы изменения нестационарных коэффициентов.

В таких условиях возникает проблема стабилизации динамических свойств или приведение к оптимальному состоянию инерционностей системы. Введением дополнительных корректирующих связей можно отчасти решить эту проблему, но в большинстве случаев такой подход связан с заметным усложнением, трудностями реализации и снижением надежности системы в целом. В связи с этим по мере повышения требований к динамическим свойствам

регулируемых систем электропривода это становится нецелесообразным.

Необходимо отметить трудности, а иногда и недоступность измерения некоторых координат движения и наличие перекрестных связей в упруговязких системах с времяпеременными параметрами, которые дополнительно усложняют задачу оптимизации динамических систем электропривода.

Рассматривая подобные системы как системы с неполным объемом априорной информации, целесообразно дополнять тиристорные схемы электропривода с подчиненными контурами не только адаптивными регуляторами, но и введением дополнительных (желательно унифицированных) контуров или устройств адаптации. Следовательно, адаптивные контуры будут наиболее целесообразны для существенно нестационарных электрических приводов, особенно при частых изменениях входных сигналов и строгих ограничениях на переходные процессы (форму, длительность).

Реализация задачи адаптивного управления при неизменной исходной структуре системы электропривода позволит создать дополнительную автоматическую систему допустимой сложности в виде контуров адаптации на уровне самонастраивающихся систем, которые обеспечат требуемое качество управления.

Разработка методики синтеза системы управления электроприводом и сравнительный анализ возможных алгоритмов управления велись применительно к унифицированному контуру системы любого класса. Считалось, что число переменных параметров не ограничено в пределах реальной сложности системы, а время перестройки их должно быть не более времени реального переходного процесса в эталонной модели на скачкообразное управление.

Анализируя различные методы описания систем управления электро-

приводами, наиболее перспективными следует признать методы идентификации, в которых процесс определения математического описания основан на обработке контролируемых входных и выходных сигналов.

Вопрос построения точных математических моделей наиболее остро встал в последнее время в связи с интенсификацией технологических процессов и необходимостью повышения точности регулирования. Разработка методов идентификации систем электропривода позволяет повысить точность результатов как математического моделирования, так и других методов расчета и распространить их на исследование динамики промышленных установок на стадии проектирования, наладки и эксплуатации, что позволит сократить эксперимент, увеличить точность и объективность результатов, полнее использовать экспериментальную информацию и повысить темпы исследований [1–3].

Широкое использование теории идентификации применительно к системам электропривода является достаточным условием, характеризующим целесообразность и актуальность дальнейших исследований. Достижение высоких качественных показателей работы САУ электроприводами возможно при совершенствовании методов их проектирования и максимальном учете реальных технологических условий.

Одним из наиболее перспективных направлений развития инженерных методов настройки промышленных систем управления электроприводами является разработка алгоритмических поисковых методов. Применение методов идентификации позволит полнее использовать информацию о действительных характеристиках объекта за счет экспериментального получения текущей информации, свойствах всей системы в целом на каждом шаге итеративного процесса оптимизации.

Опыт эксплуатации сложных нелинейных систем электропривода показывает, что в процессе работы их необходимо подналадивать как в зависимости от условий эксплуатации, так и во времени. Анализ ряда систем электропривода показывает, что отсутствие методов оперативной подналадки уменьшает надежность электрооборудования и, соответственно, предприятия несут значительный экономический урон за счет ремонта и простоев электроприводов.

На основании вышеизложенного возникает необходимость разработки экспериментальных методов определения динамических параметров системы электропривода в режиме нормальной эксплуатации и на основе этих методов – аппаратуры для определения параметров системы электропривода в режиме наладки и эксплуатации. Это позволит составить классификацию типовых звеньев и ускорить проектирование и разработку электроприводов. Кроме этого, методы идентификации позволяют осуществить косвенный замер физических величин, недоступных непосредственному измерению, – контроль температуры обмоток машин, работающих в ПВ – режимах, нестационарные моменты сопротивления на валу машины, косвенное определение различных возмущающих воздействий с количественными характеристиками, измерение различных параметров обрабатываемых деталей непосредственно в технологическом процессе и т. п.

Особенно затрудняют построение системы управления изменения характеристик управляемых объектов в процессе функционирования. Например, преобразователи без уравнивающих токов находят ограниченное применение вследствие разной величины эквивалентной постоянной времени контура регулирования тока в режимах прерывистого и непрерывного токов. Коэффициент усиления тиристорного преоб-

разователя в зоне прерывистых токов уменьшается по нелинейному закону. В этих условиях преобразователь представляет собой существенно нелинейную систему с переменными параметрами. Особенно это важно в системах управления тиристорным электроприводом с точным регулированием скорости вращения машины.

Современное развитие техники характеризуется широким использованием самонастраивающихся систем с изменяющимися в процессе функционирования законом управления и характеристиками элементов. Основным свойством таких систем является адаптация к внешним проявлениям среды и внутренним изменениям, которые вызывают отклонение системы от ее оптимального состояния. В устройствах управления автоматически анализируется информация, получаемая от управляемого процесса, и автоматически синтезируется закон управления. Для самонастраивающихся систем управления задача определения динамических характеристик объекта имеет большее значение, чем для обычных. Эти характеристики в процессе работы должны измеряться непрерывно или через малые промежутки времени в режиме нормальной эксплуатации. Чем выше скорость самонастройки, тем выше производственные показатели системы и механизма.

Однако применение линейных корректирующих устройств имеет ограниченные возможности в получении качественных динамических характеристик и точности процессов управления в автоматических системах. Хуже обстоит дело в системах, основная структура которых содержит сопутствующие нелинейности. В связи с этим стали применяться нелинейные корректирующие устройства (НКУ), обеспечивающие более высокую точность и быстродействие систем, высокую помехозащищенность и надежность.

Однако принципиально ограниченные динамические показатели тиристорных преобразователей (ТП) исключают возможность коррекции средствами управления их частотных характеристик с целью повышения быстродействия при сохранении основных принципов импульсно-фазового управления. Некоторое улучшение частотных свойств ТП вблизи граничной частоты может быть достигнуто коррекцией системы управления. Это не расширяет полосы пропускания ТП, а лишь улучшает форму АФЧХ и ослабляет влияние некоторых нежелательных особенностей ТП [4].

Такая коррекция позволяет полнее использовать предельное быстродействие ТП.

На основании вышеизложенного в процессе создания высокоточных и быстродействующих систем управления электроприводами постоянного тока, основная структура которых содержит инерционные и нелинейные звенья, сталкиваются со следующими задачами:

а) с необходимостью компенсировать инерционности звеньев основной структуры, которые определяют быстродействие системы в целом;

б) с необходимостью исключить влияние нелинейностей звеньев основной структуры, которые зачастую приводят к появлению автоколебаний в замкнутых системах, искажению основной информации, передаваемой системой, а также существенно влияют на качество переходных процессов в системе управления;

в) с задачей компенсации возмущений, действующих на систему управления.

Анализ существующих способов компенсации инерционностей в линейных системах и инерционностей и нелинейностей в нелинейных системах управления показал, что во многих слу-

чаях компенсирующие устройства физически трудно реализуемы, отсутствует достаточно простая методика их выбора и определения параметров элементов этих устройств, а линейные устройства компенсации основной структуры вообще неприемлемы для нелинейных систем управления. Особенно остро проблема стоит при проектировании сложных систем управления, содержащих в своей структуре несколько нелинейных инерционных звеньев. Эти трудности требуют нового подхода к созданию высокоточных и быстродействующих систем управления электроприводами постоянного тока.

Следовательно, для создания высокоточных и быстродействующих электроприводов необходимо: построение точных математических моделей системы электропривода совместно с объектом управления в связи с интенсификацией технологических процессов и необходимостью повышения точности регулирования; разработка методов идентификации систем электропривода с целью повышения точности как математического моделирования, так и других методов расчета и распределение их на исследование динамики промышленных механизмов на стадии проектирования, наладки и эксплуатации; определение оптимальных законов управления системой управления электроприводом, на их основе построение корректирующих устройств, применение которых в нелинейных, нестационарных системах позволит обеспечить независимость динамических свойств системы от параметрических возмущений, присущих исполнительному устройству и объекту управления; разработка методики синтеза подобных устройств, которые с минимальными погрешностями будут воспроизводить входной сигнал на выходе системы управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. Н. Попов. – СПб. : Профессия, 2003. – 752 с. : ил.

2. **Александров, А. Г.** Оптимальные и адаптивные системы / А. Г. Александров. – М. : Высш. шк., 1989. – 263 с. : ил.

3. **Куропаткин, П. В.** Оптимальные и адаптивные системы / П. В. Куропаткин. – М. : Высш. шк., 1980. – 287 с.

4. **Перельмутер, В. М.** Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока / В. М. Перельмутер, В. А. Сидоренко. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 304 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 25.03.2011

V. A. Selivanov

**On the question of constructing
high-speed electric drive systems**

Consider a system of automatic control of small-phase SCR electric drives. Their main task is to improve the dynamic performance that is achieved by using adaptive regulators of current and speed, and in the presence of transient nodes using adaptive devices at the level of autonomic systems. Analysis of various methods for describing control systems of electric shows promising methods of identification, in which the process of determining the mathematical description is based on the controlled processing of input and output signals

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 620.9.008

С. В. Босаков, д-р техн. наук, проф., В. Н. Белевич, Н. С. Щетько

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОЛОЖЕНИЯ НАКЛОННОЙ ТРЕЩИНЫ В ПРИОПОРНОЙ ЗОНЕ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ПЛИТ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ

В статье приводятся результаты теоретических исследований напряженно-деформированного состояния приопорных зон плит безопалубочного формования. Получено аналитическое выражение для формы наклонной трещины. Проведенные эксперименты подтверждают правильность теоретических результатов.

В последнее время в строительстве стали широко использовать плиты безопалубочного формования. В этих плитах отсутствует поперечная арматура и для армирования используются предварительно-напряженные канаты. Применение таких канатов позволяет использовать при изготовлении многопустотных плит перекрытий безопалубочного формования бетон более низких марок и снизить потребление цемента и удельную металлоемкость плит либо повысить уровень предварительного напряжения арматуры.

В отечественных условиях производство плит безопалубочного формования на местных материалах может отличаться от зарубежного уровня. В связи с недостаточностью сведений о характере работы в различных условиях нагружения конструкций, армированных эффективной канатной арматурой из проволоки профильного сечения европейского стандарта EN 10138-3:2000, возникла необходимость провести исследования напряженно-деформированного состояния многопустотных плит безопалубочного формования «Weiler Italia» с такой арматурой и разработать комплект технической документации на плиты для дополнения серии Б1.041.1-4.08.

Авторами выполнены теоретиче-

ские исследования НДС приопорных зон плит безопалубочного формования. Полученные результаты подтверждены данными экспериментов. Были приняты следующие предпосылки при проведении теоретических исследований.

1. Для плиты считается справедливой гипотеза плоских сечений [1].

2. До появления трещин материал плиты работает упруго. Так как уравнения равновесия одинаково справедливы в теории упругости и теории пластичности, то полученные теоретические результаты при анализе напряженного состояния в приопорных точках плиты приблизительно верны и для нелинейной стадии работы материала плиты.

3. Считается, что плита работает в условиях плоского напряженного состояния.

4. Так как на нижней и верхней поверхностях плиты нормальные и касательные напряжения равны нулю, то они принимаются равными нулю везде внутри объема плиты, за исключением мест приложения вертикальных нагрузок и опорных реакций.

Определение геометрических характеристик поперечного сечения выполнялось с помощью программы «AutoCAD» и производилось сопоставление для верификации результатов.

Определение напряженного состояния в приопорной зоне преднапряженной плиты безопалубочного формирования

Расчетная модель плиты при испытаниях приведена на рис. 1. В приопорной зоне действуют усилия от сил преднапряжения и опорной реакции $V_A = P$.

Напряжения, возникающие в плите от их действия, ввиду наличия отверстий будут образовывать тензор напряжений общего вида

$$T_H = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}. \quad (1)$$

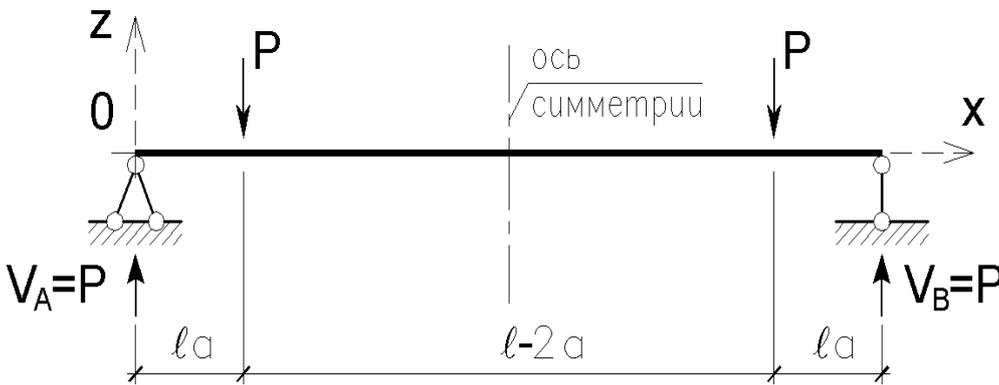


Рис. 1. Расчетная модель плиты

Однако элементарные рассуждения, подтвержденные результатами численных исследований одним из авторов на ПК «Femar», показывают, что напряжения σ_x и τ_{xz} на порядок и более превышают остальные составляющие тензора напряжений. Надо также подчеркнуть, что в местах приложения внешних сил и опорных реакций влиянием напряжения σ_z пренебрегать нельзя.

На основании отмеченных фактов авторами в дальнейшем принято, что напряженное состояние приопорной зоны плиты безопалубочного формирования описывается тензором напряжений следующего вида:

$$T_H = \begin{vmatrix} \sigma_x & 0 & \tau_{xz} \\ 0 & 0 & 0 \\ \tau_{xz} & 0 & \sigma_z \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Далее будем рассматривать точки

приопорной зоны плиты, лежащие на оси Ox (рис. 2), т. к. на ней [1] касательные напряжения τ_{xz} достигают своего максимума. Приведем формулы для их определения в точках А, В, С приопорной зоны плиты (см. рис. 2).

Приняв приведенное двутавровое сечение с шириной стенки, равной суммарной ширине ребер, и поперечную силу в пределах приопорной зоны плиты постоянной, по формуле Журавского [1] приближенно получим для точек А, В, С следующее.

$$\tau_{xz} = -\frac{3 P}{2 A}; \quad (3)$$

– для точки А

$$\sigma_x^A = 0; \quad (4)$$

– для точки В (σ_x от момента

$\frac{1}{2} P l_a$ равно 0)

$$\sigma_x^B = -\frac{1}{4} \frac{N_a + N_a'}{A}; \quad (5)$$

$$\sigma_x^B \approx -\frac{1}{2} \frac{N_a + N_a'}{A}. \quad (6)$$

– для точки С (σ_x от момента $P l_a$ равно 0)

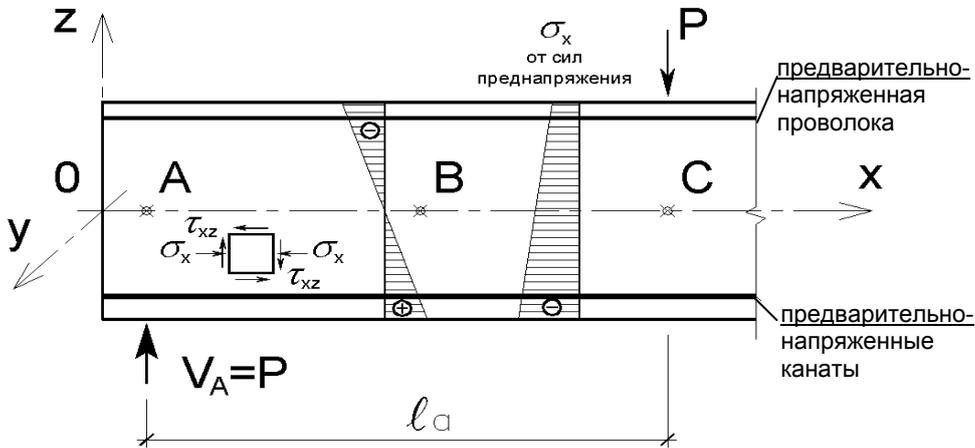


Рис. 2. Припорная зона плиты безопалубочного формирования

Определение величины и направления действия главного растягивающего напряжения σ_1 в точках А, В, С припорной зоны плиты безопалубочного формирования

Точка А

Напряженное состояние на основании (2) и (4) описывается тензором напряжений

$$T_H^A = \begin{vmatrix} 0 & 0 & \tau_{xz} \\ 0 & 0 & 0 \\ \tau_{xz} & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Для этого тензора напряжений искомые величины имеются в литературе. Они равны [1]:

$$\sigma_1 = |\tau_{xz}|; \quad \ell_1 = -\frac{\sqrt{2}}{2};$$

$$m_1 = 0; \quad n_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad (8)$$

где σ_1 – главное растягивающее напряжение; ℓ_1, m_1, n_1 – направляющие косинусы первой главной площадки [1].

Точка В

$$T_H^B = \begin{vmatrix} \sigma_x & 0 & \tau_{xz} \\ 0 & 0 & 0 \\ \tau_{xz} & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Инварианты напряженного состояния [1]:

$$I_1 = \sigma_x^B; \quad I_2 = -\tau_{xz}^2; \quad I_3 = 0.$$

Главное растягивающее напряжение является наибольшим корнем кубического уравнения

$$\sigma^3 - \sigma_x^B \sigma^2 - \tau_{xz}^2 \sigma = 0;$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x^B}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_x^B)^2}{4} + \tau_{xz}^2}. \quad (10)$$

Находим направляющие косинусы первой главной площадки из системы

$$\begin{cases} (\sigma_x^B - \sigma_1) \ell_1 + \tau_{xy} m_1 + \tau_{xz} n_1 = 0; \\ (\sigma_y^B - \sigma_1) m_1 = 0; \\ \ell_1^2 + m_1^2 + n_1^2 = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Получаем:

$$\ell_1 = \sqrt{1 - n_1^2}; \quad m_1 = 0;$$

$$n_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\tau_{xz}^2}{(\sigma_x^B - \sigma_1)^2}}}. \quad (12)$$

Точка С

Нужные результаты получаем из формул (10) и (12) заменой σ_x^B на σ_x^C .

Места приложения вертикальных нагрузок и опорных реакций

$$T_H = \begin{vmatrix} \sigma_x & 0 & \tau_{xz} \\ 0 & 0 & 0 \\ \tau_{xz} & 0 & \sigma_z \end{vmatrix}.$$

Опуская промежуточные вычисления, сразу приводим окончательные результаты:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left(\sigma_x + \sigma_z + \sqrt{\sigma_x^2 - 2\sigma_x\sigma_z + \sigma_z^2 + 4\tau_{xz}^2} \right);$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} \left(\sigma_x + \sigma_z - \sqrt{\sigma_x^2 - 2\sigma_x\sigma_z + \sigma_z^2 + 4\tau_{xz}^2} \right);$$

$$\{\ell_1, m_1, n_1\} = \left\{ -\frac{-\sigma_x + \sigma_z - \sqrt{\sigma_x^2 - 2\sigma_x\sigma_z + \sigma_z^2 + 4\tau_{xz}^2}}{2\tau_{xz}}, 0, 1 \right\};$$

$$\{\ell_3, m_3, n_3\} = \left\{ -\frac{-\sigma_x + \sigma_z + \sqrt{\sigma_x^2 - 2\sigma_x\sigma_z + \sigma_z^2 + 4\tau_{xz}^2}}{2\tau_{xz}}, 0, 1 \right\}.$$

Авторы отмечают, что самостоятельного значения при исследовании данного вопроса изучение свойств этого тензора не имеет.

Пример определения величины главного растягивающего напряжения σ_1 для плиты безопалубочного формования 2ПТМ 72.12.22-6

Для этой плиты ($P = 150980$ Н – нагрузка, при которой образовалась наклонная криволинейная трещина) получаем следующее:

$$N_a = 900 \cdot 8\pi \cdot 9,3^2 / 4 = 489089 \text{ Н};$$

$$N_a' = 400 \cdot 4\pi \cdot 5^2 / 4 = 7854 \text{ Н};$$

$$A = 301 \cdot 1,2 / 2500 = 0,14448 \text{ м}^2;$$

$$\sigma_x^B = (N_a + N_a') / 4A = 1,71977 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2;$$

$$\sigma_x^C = (N_a + N_a') / 2A = 3,43953 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2;$$

$$\tau_{xz} = 3P / 2A = 1,56748 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2.$$

Точка А (см. рис. 2)

$$\sigma_x^A = 15,67 \text{ кг/см}^2; \quad \alpha_A = 45^0.$$

Точка В (см. рис. 2)

$$\sigma_1^B = 7,655 \text{ кг/см}^2; \quad \ell_1^B = 0,5335;$$

$$\alpha_B = 32,2^0; \quad n_1^B = 0,8458.$$

Точка С (см. рис. 2)

$$\sigma_1^C = 6,808 \text{ кг/см}^2; \quad \ell_1^C = 0,4080;$$

$$\alpha_C = 24,1^0; \quad n_1^C = 0,9130.$$

Анализ полученных результатов говорит о том, что наклонная трещина в приопорной зоне преднапряженной плиты безопалубочного формования теоретически должна иметь криволинейный характер. На рис. 3 ее предполагаемая траектория показана пунктирной линией. В местах левее приложения опорной реакции и правее приложения внешней нагрузки направления главных напряжений совпадают с направлением осей координат.

Определение уравнения трещины в глобальной системе координат Oxz

Обозначим через $Z(x)$ уравнение криволинейной трещины в системе координат рис. 3. Тогда следует, что $Z(x)$ является решением обыкновенного диффе-

ренциального уравнения первого порядка

$$\frac{dZ}{dx} = \frac{n_3}{l_3} \quad (13)$$

Будем считать, что нормальное напряжение σ_x на отрезке $0 \leq x \leq l_a$ меняется по закону прямой

$$\sigma_x(x) = \frac{N_a + N_a' x}{2A} = \frac{\sigma_{x0}}{l_a} x.$$

С учетом (11) уравнение (13) запишется следующим образом:

$$\frac{dZ}{dx} = -\sigma_{x0} \frac{x}{2\tau_{xz}l_a} + \sqrt{1 + \left(\sigma_{x0} \frac{x}{2\tau_{xz}l_a}\right)^2} \quad (14)$$

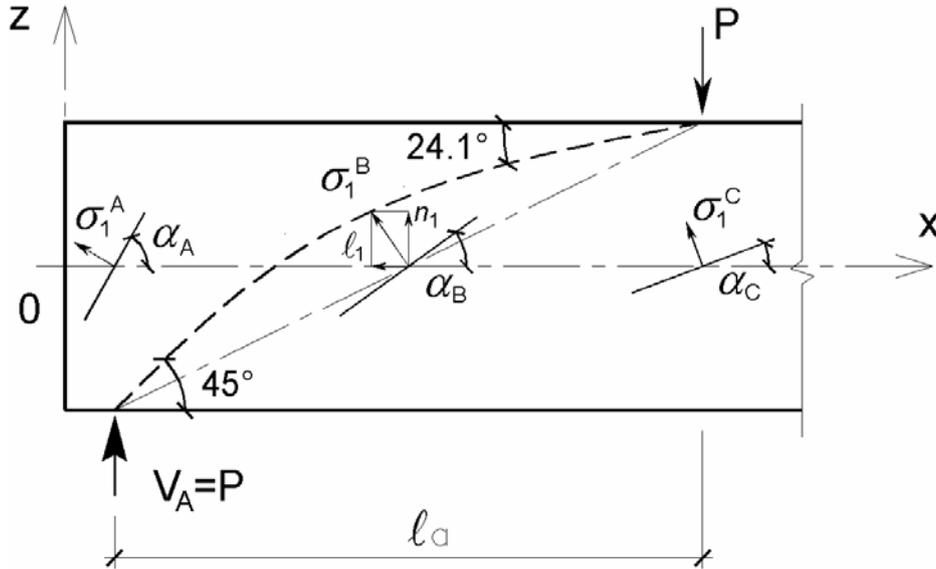


Рис. 3. Направления главного напряжения σ_1 в приопорной зоне плиты безопалубочного формования 2ПТМ 72.12.22-6

Решением (14) будет [2] следующее:

$$Z(x) = \frac{1}{2} \left[-\sigma_{x0} \frac{x^2}{4\tau_{xz}l_a} + \frac{x}{2} \times \sqrt{4 + \sigma_{x0}^2 \frac{x^2}{\tau_{xz}^2 l_a^2}} + 2 \frac{l_a \tau_{xz}}{\sigma_{x0}} \operatorname{arcSh} \frac{x\sigma_{x0}}{2l_a \tau_{xz}} \right] \quad (15)$$

В полученном решении (15) два неизвестных параметра: l_a и C_1 . Их находим из граничных условий

$$x = 0; \quad Z(0) = -\frac{h}{2};$$

$$x = l_a; \quad Z(l_a) = \frac{h}{2}.$$

Следовательно,

$$C_1 = -\frac{h}{2};$$

$$l_a = \left[(4\sigma_{x0} \tau_{xz}) / (-\sigma_{x0}^2 + \sigma_{x0} \tau_{xz} \times \sqrt{4 + \frac{\sigma_{x0}^2}{\tau_{xz}^2} + 4\tau_{xz}^2 \operatorname{arcSh} \frac{\sigma_{x0}}{2\tau_{xz}}}) \right] h. \quad (16)$$

Для плиты 2ПТМ 72.12.22-6, рассмотренной выше, получаем теоретически вычисленное значение длины зоны передачи напряжений $l_a = 35,1$ см, которое хорошо согласуется с ранее полученными результатами [3].

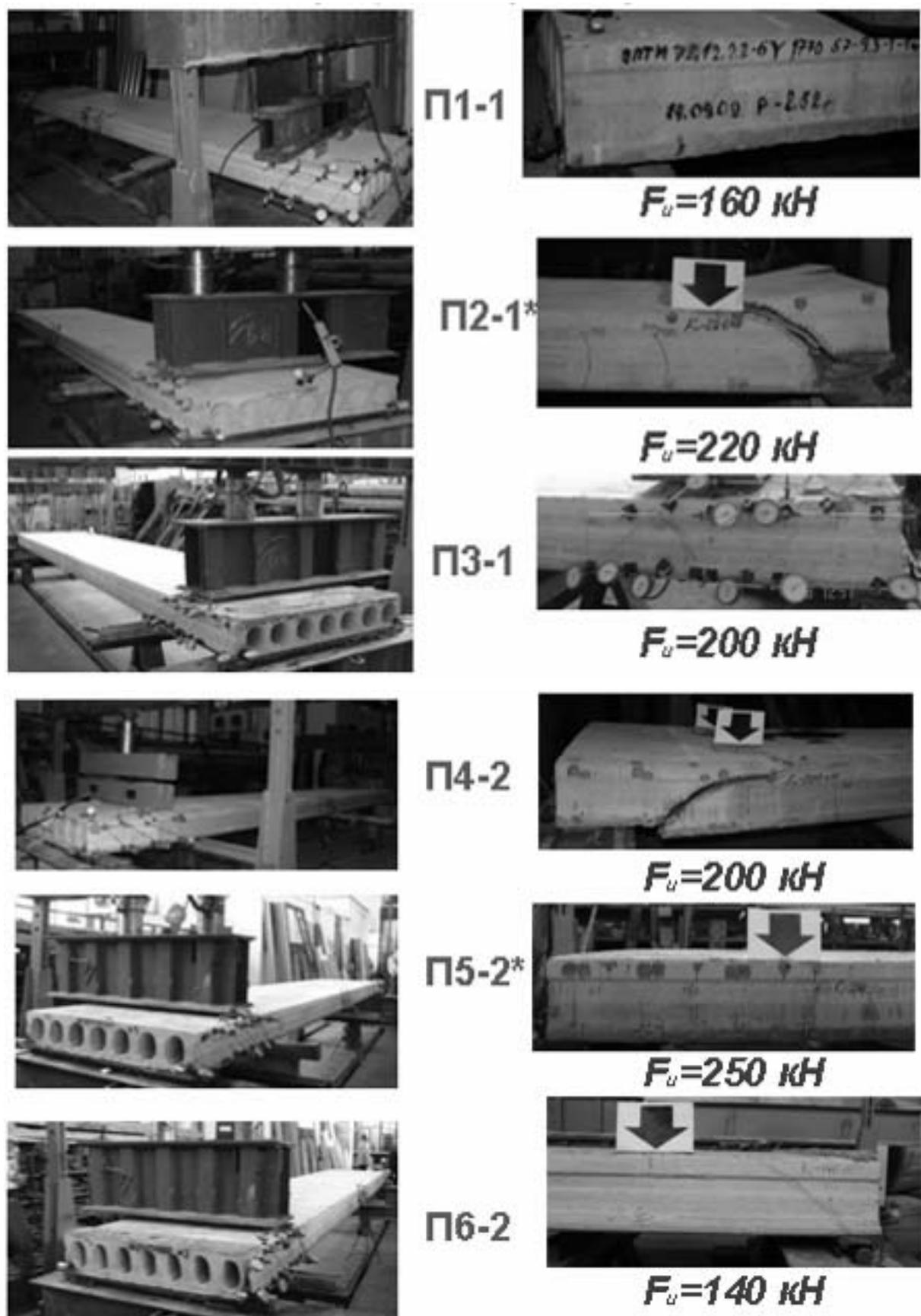


Рис. 4. Испытания приопорных зон плит на действие поперечных сил

Полученные теоретические результаты подтверждаются данными экспериментальных исследований, проведенных в институте БелНИИС. На рис. 4 показаны испытания и результаты испытаний плит безопалубочного формования при исследовании НДС приопорной зоны плит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александров, А. В.** Сопротивление материалов / А. В. Александров, В. А. Потапов, Б. П. Державин. – М. : Высш. шк., 2000. – 359 с.
2. **Кулешов, А. А.** Уравнения математической физики в системе Mathematica / А. А. Кулешов. – Минск : БГУ, 2004. – 294 с.
3. **Босаков, С. В.** Определение величины втягивания канатов в изгибаемых преднапряженных железобетонных плитах безопалубочного формования / С. В. Босаков, В. Н. Белевич, Н. С. Щетько // Вестн. БрГТУ. – 2010. – № 1 (61). – С. 46–50.

РУП «Институт БелНИИС»
Материал поступил 11.11.2010

**S. V. Bosakov, V. N. Belevich,
N. S. Shchetko**
**Theoretical researches on definition
of the inclined crack position in the
bysupporting zone of stressed plates
of the off-form molding**

In the article the results of theoretical researches of tensely deformed condition of bysupporting zones of plates of off-form molding are presented. Analytic form for the inclined crack has been obtained. The carried out experiments prove the correctness of the theoretical results.

УДК 620.9.008

С. Д. Семенюк, д-р техн. наук, С. Н. Березовский, канд. техн. наук, доц.,
А. Н. Терещенко

РАЦИОНАЛЬНАЯ И ЭФФЕКТИВНАЯ РАЗРАБОТКА НЕРУДНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ПЕСОК, ГРАВИЙ) В КАРЬЕРАХ МОГИЛЕВСКОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕМОНТА АВТОДОРОГ

В статье рассмотрены вопросы ресурсо- и энергосбережения при добыче нерудных строительных материалов открытым способом. Карьеры, находящиеся на балансе дорожных организаций Могилевской области, предлагается разрабатывать с минимальными потерями. В статье показано, что отрабатывать обводненные запасы полезного ископаемого мощностью до 4 м в этих карьерах можно экскаваторами типа «драглайн». Также авторами исследована закономерность изменения содержания фракции гравия +5 мм в массиве, поскольку случайные изменения содержания гравия в массиве вызывают изменения угла откоса подводного забоя, что существенно влияет на производительность экскаватора и карьера в целом. Установлено влияние на угол откоса забоя и штабеля содержания гравия в массиве +5 мм, которое не противоречит SL-распределению Джонсона.

Могилёвское областное управление Госпромнадзора осуществляет контроль за ведением горных работ открытым способом на 38 предприятиях. Под надзором имеется 44 карьера нерудных строительных материалов. Из них на двух карьерах годовая производительность составляет более 1 млн м³ в год, на трех – производительность от 50 до 300 тыс. м³ в год, на остальных 39 карьерах – менее 50 тыс. м³ в год. В Могилевской области песчано-гравийных карьеров всего 12, из них только два крупных: «Козуличи» Кировского района и «Дубровка» Шкловского района, которые находятся на балансе УТПК «Облдорстрой». Запасы песчано-гравийной смеси (ПГС) в карьере «Козуличи» в ближайшее время будут выработаны. На остальных 10 карьерах, которые занимают небольшую площадь, в основном от 5 до 15 га, качество песчано-гравийной смеси не всегда соответствует требованиям стандартов и нормативных актов. В основном, на качество ПГС оказывает влияние большое содержание глинистых частиц в смеси, а также большое содержание гравия в смеси мелких фракций 5...10 и 10...20 мм, что не устраивает дорожные предприятия, кото-

рые разрабатывают эти карьеры. Часто при разработке гравийных карьеров встречаются прослойки некондиционных пород, что говорит о низком качестве проведенных геологоразведочных работ. Особенно редко встречается песчано-гравийная смесь на востоке и юге Могилевской области. Многим предприятиям приходится возить автотранспортом гравийный материал с ближайших областей на расстояние до 80 км, что вызывает большие неоправданные расходы. Проблему дефицита песчано-гравийной смеси в Могилевской области можно решить, отрабатывая обводненные запасы нерудных строительных материалов.

Все дорожные предприятия Могилевской области заказывают геологоразведочные работы таким образом, чтобы запасы полезного ископаемого утверждались на 0,5...1 м выше уровня грунтовых вод. Обводненные запасы на глубину до 3 м без водопонижения можно отработать экскаваторами с емкостью ковша до 1 м³ типа «драглайн» (Э-652, ЭО-5111, ЭО-4111) или экскаваторами типа «обратная лопата» (ЭО-4124, ЭО-4321), которые имеются на многих предприятиях. Нетрудно подсчитать,

что даже при площади месторождения в 10 га отработка обводненных запасов на глубину 3 м (а учитывая целик в 0,5...1 м, который оставляется до уровня грунтовых вод, – то на глубину 3,5...4 м) даст дополнительный объем полезного ископаемого в 350...400 тыс. м³. В дорожно-ремонтно-строительных управлениях годовая производительность по песку и песчано-гравийной смеси в большинстве случаев составляет 15...20 тыс. м³, следовательно, этот дополнительный объем в 350...400 тыс. м³ продлит срок службы карьера до 20 лет.

Разработка обводнённых песчаных и гравийно-песчаных месторождений осуществляется экскаваторным и гидромеханизированным способами. Разработка месторождений гидромеханизированным способом выполняется с помощью земснарядов. Область их применения ограничивается глубиной отработки залежи до 10...15 м и содержанием каменистых включений (гравия и валунов) до 40 %. Недостатком данной технологии является зависимость от климатических условий и сезонный характер работы земснарядов.

Разработка частично обводнённых и обводнённых месторождений экскаваторным способом осуществляется с полным или частичным осушением пород, нижним черпанием, в том числе из-под воды. Экскаваторы карьерно-строительного типа, получившие широкое применение на карьерах, допускают отработку обводнённой толщи без осушения на глубину до 4...5 м. При разработке без осушения или с частичным водопонижением драглайнами или обратными лопатами полезное ископаемое складировается в навал (штабель) на горизонте установки экскаватора для его естественного обезвоживания. Из навала полезное ископаемое вынимается и отгружается преимущественно в автомобильный транспорт одноковшовыми фронтальными погрузчиками и прямыми лопатами (реже драглайнами). При

добыче полезного ископаемого из-под воды рабочие параметры экскаваторов с оборудованьями драглайна используются не полностью и забой не отрабатывается на глубину, соответствующую максимальной глубине черпания. Это связано с тем, что угол откоса обводнённого забоя является менее устойчивым и имеет более пологий откос. При разрыхлении породы ковшем она вблизи прохода ковша теряет устойчивость, размывается водой и нивелирует дно подводной выработки на уровне выше глубины черпания. Случайные изменения содержания гравия в массиве вызывают изменения угла откоса подводного забоя. В этой связи значительный интерес представляет собой исследование закономерностей изменения содержания фракции гравия +5 мм в массиве.

Увеличение содержания гравия в породе благоприятно сказывается на устойчивости откоса, что позволяет увеличить глубину выемки. С увеличением содержания гравия угол откоса подводного забоя возрастает (рис. 1) [1].

Для аналитического описания зависимости рассмотрим две произвольные точки на графике (см. рис. 1) (пусть это будут точки с координатами (50; 20) и (75; 28) соответственно).

Уравнение $\alpha_{ПЗ} = f(\beta)$ представим в виде определителя 2-го порядка:

$$\begin{vmatrix} \beta - 50 & \alpha_{ПЗ} - 20 \\ 25 & 8 \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

Из (1) следует,

$$(\beta - 50) \cdot 8 = 25(\alpha_{ПЗ} - 20),$$

откуда

$$\alpha_{ПЗ} = 0,32\beta + 4. \quad (2)$$

Изменение содержания гравия +5 мм в залежи полезного ископаемого вызывает вариацию устойчивого угла откоса подводного забоя и, как следствие, максимальной глубины черпания, соответствующей ей высоты уступа и

ширины экскаваторной заходки. Содержание гравия фракции +5 мм на гравийно-песчаных месторождениях изучалось нами по результатам геологоразведочных работ [2]. Первичная обработка опытных данных предусматрива-

ла определение средней дисперсии и стандартного отклонения выборки, группирование элементов массива по классам (интервалам) с целью последующего их анализа.

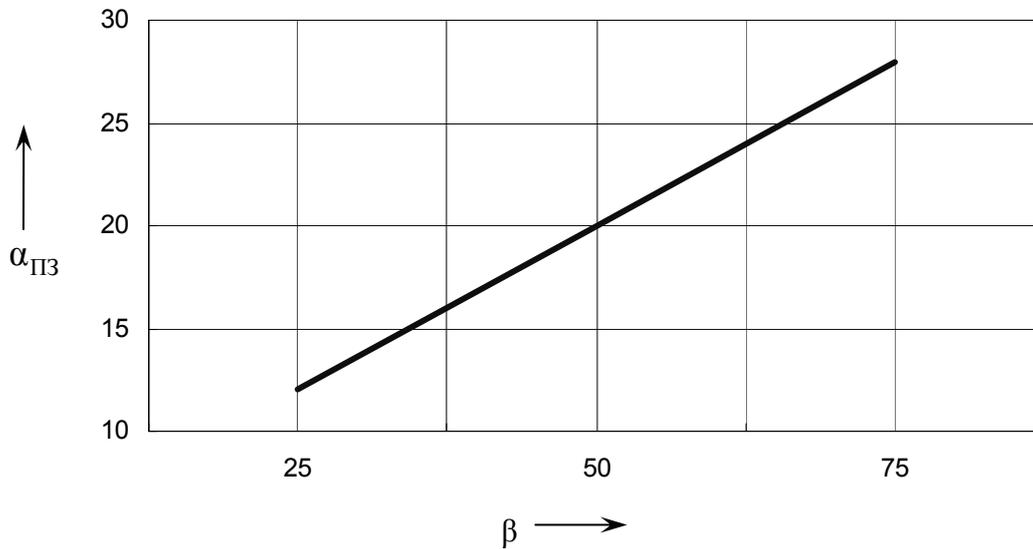


Рис. 1. Зависимость угла откоса подводного забоя $\alpha_{ПЗ}$ от содержания в массиве фракции +5 мм β

Определение длины интервалов $Z_1 \dots Z_3$ выполнялось по известным формулам Брукса, Вайнберга, Стреджерса с последующим определением среднего значения Z_y [2]:

– по Бруксу

$$Z_1 = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{5 \lg N}; \quad (3)$$

– по Вайнбергу

$$Z_2 = \frac{1}{9}(x_{\max} - x_{\min}); \quad (4)$$

– по Стреджерсу

$$Z_3 = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,2 \lg N}, \quad (5)$$

где x_{\max} , x_{\min} – максимальное и минимальное значения элемента массива соответственно; N – число элементов массива.

Большой объём данных предопределил применение компьютеризированной их обработки, предусматривающей файловую организацию данных наблю-

дений с последующим определением необходимых параметров.

Номера классов, в которые попадает очередное наблюдение, считываемое из файла программой, определялись с помощью целочисленной функции

$$y = \text{int} \left(\frac{x(i) - L}{Z_y} \right), \quad (6)$$

где Z_y – длина интервала; $x(i)$ – очередное значение элемента массива; L – нижняя граница класса.

Число попаданий (частота) в класс Y определяли с помощью стандартной конструкции с накоплением данных в переменной $F(Y)$:

$$F(Y) = F(Y) + 1. \quad (7)$$

В табл. 1 приведено эмпирическое распределение содержания гравия +5 мм, полученное в результате обработки данных геологоразведочных работ.

Табл. 1. Эмпирическое распределение содержания гравия +5 мм

Номер класса Y	Класс	Центр	Частота $F(Y)$
1	11,98...18,78	15,4	13
2	18,78...25,57	22,2	30
3	25,57...32,37	29,0	69
4	32,37...39,16	35,8	45
5	39,16...45,96	42,6	18
6	45,96...52,75	49,4	11
7	52,75...59,55	56,2	3
8	59,55...66,34	62,9	1
9	66,34...73,14	69,7	1
10	73,14...79,93	76,5	1

При подборе теоретического распределения для содержания гравия +5 мм рассматривались альтернативные распределения, используемые для описания неотрицательных значений, из наиболее общих распределений семейства Пирсона (кривая III-типа, она же – гамма-распределение) и Джонсона (SL-распределение). Оценка приемлемости моделей осуществлялась по критерию χ^2 -Пирсона [3].

Статистический анализ моделей показал, что наилучшей моделью распределения содержания гравия фракции +5 мм в массиве является SL-распределение Джонсона, которое удовлетворяет условию $\chi^2_{выч} \leq \chi^2_{табл}$. При восьми степенях свободы вычисленное значение χ^2 составляет 12,26 против 15,5 до-

пустимого для 5-процентного уровня значимости. Для гамма-распределения вычисленное значение χ^2 превышает табличное значение критерия Пирсона ($19,6 > 15,5$).

Таким образом, распределение гравия +5 мм в массиве не противоречит SL-распределению Джонсона и функцию плотности вероятности для содержания гравия можно представить уравнением (рис. 2)

$$y = \frac{\eta}{\sqrt{2\pi\beta}} \exp \left[-\frac{1}{2} \eta^2 \left(\frac{\gamma^*}{\eta} + \ln \beta \right)^2 \right], \quad (8)$$

где η , γ^* – параметры формы SL-распределения Джонсона; β – содержание в массиве гравия +5 мм.

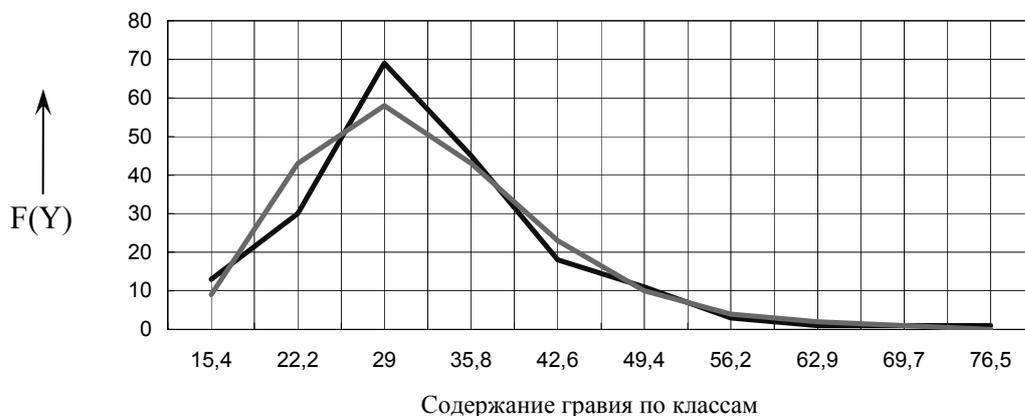


Рис. 2. Сравнение эмпирического и теоретического распределения фракции гравия +5 мм: 1 – эмпирическое распределение; 2 – SL-распределение Джонсона

Для определения наиболее вероятного значения содержания гравия +5 мм в массиве выполним дифференцирование (8) по β :

$$\frac{dy}{d\beta} = \frac{\eta}{\sqrt{2\pi}} \left\{ -\beta^2 \exp \left[-\frac{1}{2} \eta^2 \left(\frac{\gamma^*}{\eta} + \ln \beta \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \eta^2 \left(\frac{\gamma^*}{\eta} + \ln \beta \right)^2 \right] \times \right. \\ \left. \times \left(-\frac{1}{2} \eta^2 \right) 2 \left(\frac{\gamma^*}{\eta} + \ln \beta \right) \frac{1}{\beta^2} \right\} \quad (9)$$

Преобразовав выражение в фигурных скобках, получим

$$\frac{dy}{d\beta} = \frac{\eta}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \eta^2 \left(\frac{\gamma^*}{\eta} + \ln \beta \right)^2 \right] \times \\ \times \left[-\frac{1}{\beta^2} - \frac{\eta^2}{\beta^2} \left(\frac{\gamma^*}{\eta} + \ln \beta \right) \right]. \quad (10)$$

Из уравнения видно, что производная обращается в нуль, если

$$-\frac{1}{\beta^2} - \frac{\eta^2}{\beta^2} \left(\frac{\gamma^*}{\eta} + \ln \beta \right) = 0;$$

тогда

$$\ln \beta + \frac{1}{\eta^2} = -\frac{\gamma^*}{\eta}.$$

Приведем последнее выражение к виду

$$\ln \left(\beta \cdot \exp \left(\eta^{-2} \right) \right) = \ln \left(\exp \left(-\gamma^* / \eta \right) \right),$$

откуда

$$\beta = \exp \left(-\gamma^* / \eta \right) \cdot \exp \left(-\frac{1}{\eta^2} \right). \quad (11)$$

Подставляя полученное выражение в формулу (2), получим соотношение для определения наиболее вероятного значения угла откоса подводного забоя драглайна

$$\alpha_{пз} = 0,32 \exp \left(\frac{-\gamma^*}{\eta} \right) \cdot \exp \left(-\frac{1}{\eta^2} \right) + 4. \quad (12)$$

Высота уступа, обрабатываемого драглайном, определяется по формуле

$$H = \left(R_{ч} - \frac{b}{2} - l_{п} \right) \operatorname{tg} \gamma, \quad (13)$$

где $R_{ч}$ – радиус черпания драглайна; b – длина хода драглайна; $l_{п}$ – длина шага передвижки; γ – угол устойчивого откоса.

Подставляя в формулу (13) вместо угла устойчивого откоса угол подводного откоса забоя, получим

$$H = \left(R_{ч} - \frac{b}{2} - l_{п} \right) \operatorname{tg} \left[0,32 \exp \left(-\gamma^* / \eta \right) \times \right. \\ \left. \times \exp \left(-\frac{1}{\eta^2} \right) + 4 \right]. \quad (14)$$

При добыче ПГС из-под воды полезное ископаемое размещается на рабочей площадке в штабель для обезвоживания. Поэтому при определении ширины рабочей площадки необходимо учитывать параметры штабеля и, в частности, ширину его основания, которая зависит от его высоты и угла откоса штабеля. Согласно [1], угол откоса штабеля зависит от содержания гравия +5 мм в массиве (рис. 3).

Для аналитического описания приведенной зависимости выберем две произвольные точки на графике с координатами (25; 36) и (50; 26) соответственно и представим функцию $\alpha_{ш} = f(\beta)$ в виде определителя 2-го порядка:

$$\begin{vmatrix} \beta - 25 & \alpha_{ш} - 36 \\ 25 & 10 \end{vmatrix} = 0. \quad (15)$$

Из (15) следует,

$$-10(\beta - 25) = 25(\alpha_{ш} - 36),$$

откуда

$$\alpha_{ш} = -0,4\beta + 46. \quad (16)$$

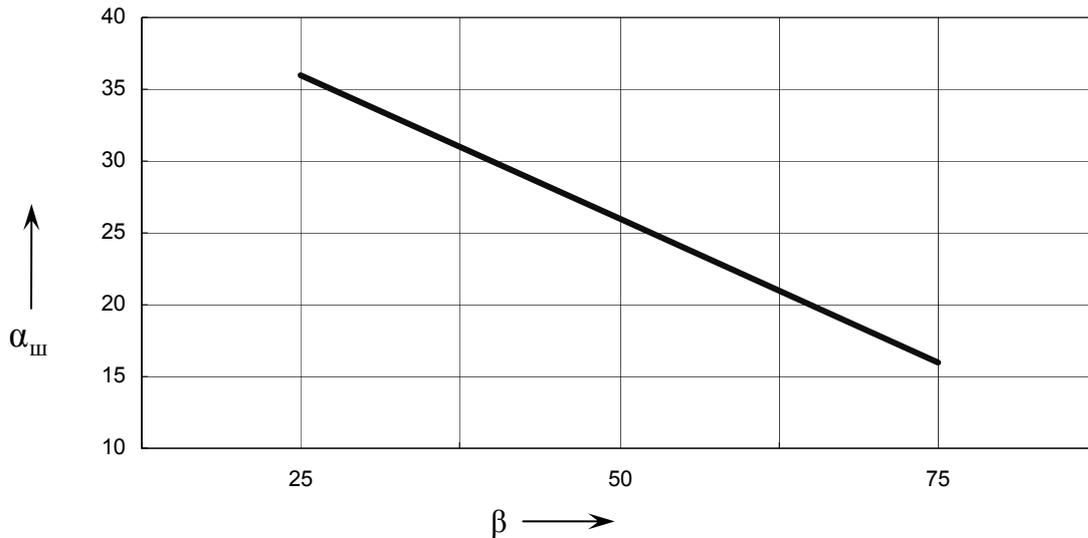


Рис. 3. График зависимости угла откоса штабеля $\alpha_{шт}$ от содержания гравия +5 мм β

Подставляя в полученную формулу выражение для определения выхода фракции +5 мм, получим, что наиболее вероятный угол откоса штабеля

$$\alpha_{шт} = -0,4 \exp\left(\frac{-\gamma^*}{\eta}\right) \times \exp\left(-\frac{1}{\eta^2}\right) + 46. \quad (17)$$

Рассмотрим влияние содержания гравия +5 мм на ширину экскаваторной заходки при отработке обводнённого забоя с промежуточным складированием добываемого сырья в штабель. Так как вся вынимаемая из заходки порода предварительно размещается в штабель, должно соблюдаться равенство удельной ёмкости экскаваторной и отвальной заходки. Под удельной ёмкостью заходки здесь понимается её объём, приходящийся на 1 м длины заходки, т. е. можно записать

$$S_o = S_э \cdot K_{po}, \quad (18)$$

где S_o и $S_э$ – удельные ёмкости отвальной и экскаваторной заходки соответственно; K_{po} – коэффициент разрыхления породы в отвале (штабеле).

Принимая во внимание незначительную величину коэффициента разрыхления породы в отвале ($K_{po} = 1,02$), можно вышеприведенное равенство записать в виде

$$\frac{A_o}{2} \cdot H_o = A \cdot H, \quad (19)$$

где A_o , A – ширина основания штабеля и экскаваторной заходки соответственно; H_o , H – высота отвала и уступа соответственно.

Следовательно,

$$A = \frac{A_o H_o}{2H}. \quad (20)$$

Исследуем основные факторы, влияющие на ширину и высоту отвальной заходки. Наиболее часто выемку породы из отвальной заходки осуществляют прямой лопатой или погрузчиком. Во всех случаях высота отвала не должна превышать значений, установленных правилами безопасности.

Определим предельную высоту отвала через максимальную высоту черпания из соотношения $H_o \leq H_{чmax}$. Тогда ширина экскаваторной заходки по данному условию составит:

$$A \leq \frac{A_0 \cdot H_{ч\max}}{2H}. \quad (21)$$

Допустимая высота штабеля по условию черпания влияет на ширину отвальной заходки. Для отвала с треугольной формой сечения можно записать, что

$$\frac{A_0}{2} = H_{ч\max} \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{ш}, \quad (22)$$

откуда

$$A_0 = 2H_{ч\max} \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{ш}, \quad (23)$$

или с учётом (22) и (23)

$$A_0 = 2H_{ч\max} \times \left\{ \operatorname{ctg} \left[-0,4 \left[\begin{array}{l} \exp\left(-\frac{\gamma^*}{\eta}\right) \times \\ \times \exp\left(-\frac{1}{\eta^2}\right) \end{array} \right] + 46 \right] \right\}, \quad (24)$$

и ширина экскаваторной заходки

$$A \leq \frac{H_{ч\max}^2 \operatorname{ctg} \left\{ -0,4 \left[\begin{array}{l} \exp\left(-\frac{\gamma^*}{\eta}\right) \times \\ \times \exp\left(-\frac{1}{\eta^2}\right) \end{array} \right] + 46 \right\}}{H}. \quad (25)$$

Значение ширины штабеля (отвальной заходки) следует дополнительно проверять по условию максимального радиуса разгрузки. Это легко сделать

с помощью графических построений с учётом места расположения оси вращения драглайна, размеров ограждающего вала и ширины бермы безопасности.

Выводы

При определении параметров системы разработки с использованием драглайнов в обводненных условиях необходимо учитывать влияние на угол откоса забоя и штабеля содержания гравия в массиве +5 мм, которое не противоречит SL-распределению Джонсона. Полученные зависимости позволяют определить основные параметры системы разработки драглайнами, работающими нижним черпанием, наиболее вероятные значения высоты уступа, ширину штабеля и экскаваторной заходки при добыче гравийно-песчаной породы из обводненного забоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мальшева, Н. А.** Технология разработки месторождений нерудных строительных материалов / Н. А. Мальшева, В. Н. Сиренко. – М. : Недра, 1977. – 392 с.
2. Отчет о детальной разведке месторождения ГПС «Бестреньское – южный участок» Дрибинского района Могилевской области / С. Н. Березовский. – Могилев : Могилевоблдорстрой, 2006. – 55 с.
3. **Гофман, В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гофман. – М. : Высш. шк., 1977. – 479 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 24.01.2011

**S. D. Semenuk, S. N. Berezovsky,
A. N. Tereshchenko**
**Rational and effective working out of
nonmetallic building materials (sand,
gravel) for building and repair of
motorways in open-cast mines of
the Mogilev area**

In the article questions of resource - and energy-consumption at opencast extraction of nonmetallic building materials are considered. The open-cast mines which are on balance of the road organizations of the Mogilev area are offered to be developed with minimum losses. The article shows that flooded mineral stocks with the capacity up to 4 m in the open-cast mines can be developed by «dragline» excavators. The authors have also studied laws of change of the gravel fraction content of +5 mm in a file as accidental variations of gravel fraction content in a file cause the change of an angle of slope of an underwater face, which essentially influences the productivity of the excavator and the open-cast mine in general. Influence of +5 mm gravel content in the file on the angle of a slope of the face and the stack, which does not contradict to Johnson's SL of distribution has been established.

ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 331.45

С. Д. Галюжин, канд. техн. наук, доц., В. М. Пускова, М. И. Рущкий

АНАЛИЗ НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ ПРИ ШТАМПОВКЕ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА

Изложены результаты анализа трех тяжелых несчастных случаев, произошедших на предприятиях Могилевской области при штамповке листового металла. Из рассмотренных несчастных случаев два произошли по причине невыполнения требований безопасности по ограждению штампового пространства прессы, а один – из-за нарушения штамповщиком технологического процесса и инструкции по охране труда.

При выполнении работ по штамповке листового металла на предприятиях Могилевской области произошел ряд несчастных случаев с тяжелым исходом. Их анализ показывает, что не всегда выполняются требования, изложенные в эксплуатационной документации. Приведем некоторые из них.

1. Штамповщик участка штамповки производственного частного унитарного предприятия (ЧУП) «Универсал Бобруйск» Общественного объединения «Белорусское общество глухих» при изготовлении детали на прессе К-2130А, инв. № 40426, получил травму кисти правой руки с тяжелым исходом.

При проведении экспертизы выявлено следующее:

– пресс К-2130А установлен на участке ЧУП «Универсал-Бобруйск» (рис. 1);

– во время получения травмы штамповщик изготавливал деталь «манжета шланга» в штампе на прессе К-2130А;

– согласно технологическому процессу упомянутые детали изготавливают-

ся одним штамповщиком при ручной подаче заготовки из полосы в штамп и педальном включении прессы.

Пресс К-2130А 1 (см. рис. 1) снабжен стационарно установленным шкафом электрического управления 2 и связанной с ним переносной педалью управления 3. На передней панели прессы расположено двуручное рычажное управление 4. На столе прессы установлены штамп 5 и защитное ограждение 6 рабочей зоны штампа. На дверце прессы помещена табличка 7 с изображением товарного знака завода-изготовителя. На левой стороне прессы расположены надпись инвентарного номера прессы «№ 40436» и табличка завода-изготовителя с техническими данными прессы. На табличке указано, что пресс «типа К-2130А, заводской № 685, изготовлен Барнаульским заводом механических прессов в 1965 г.».

Согласно руководству по монтажу и эксплуатации на прессе предусмотрена работа в режиме «одиночные ходы педалью». Этим режимом разрешается пользоваться:

«... при штамповке из листа, полосы или крупногабаритных заготовок, которые в процессе опускания ползуна необходимо удерживать руками только при наличии неподвижного ограждения штампового пространства;

... при штамповке из штучных заготовок только при наличии защитного устройства штампового пространства, исключающего нахождение рук в опасной зоне в период опускания ползуна».

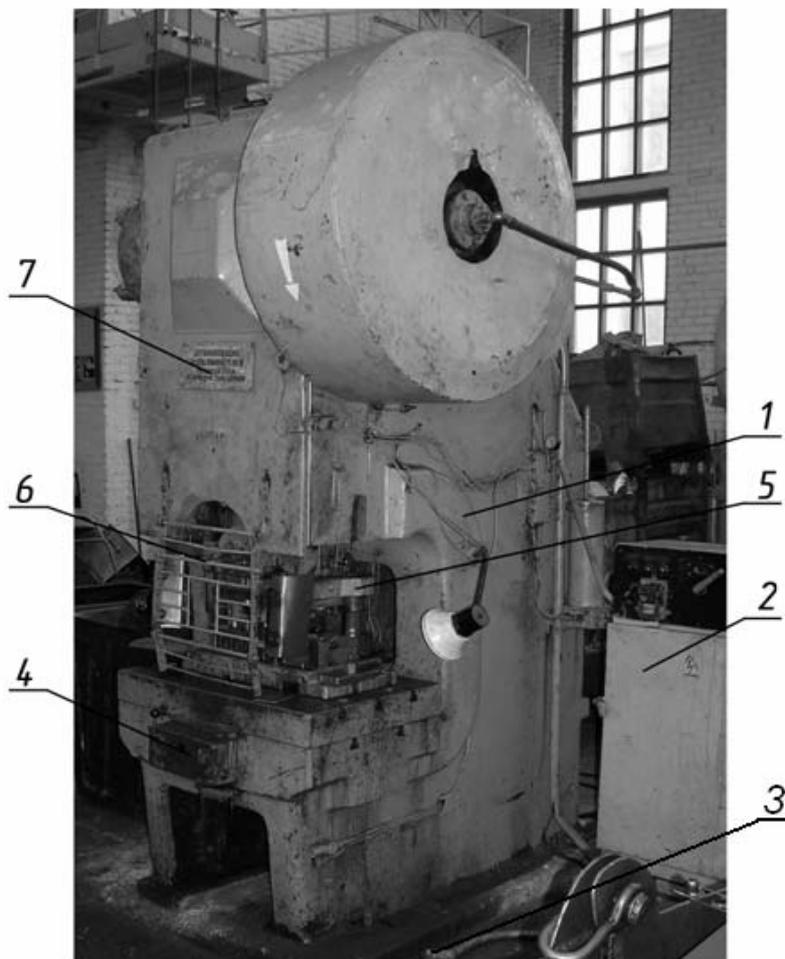


Рис. 1. Общий вид прессы

Схема защитного устройства, содержащего переднюю 8 и две боковые 9 решетки, согласно эксплуатационной документации на пресс К-2130А, приведена на рис. 2.

Согласно технологическому процессу детали типа «манжета» изготавливаются одним штамповщиком. Ручная подача заготовок из полосы в штамп и педальное включение прессы разре-

шаются «... только при наличии неподвижного ограждения штампового пространства, устраняющего опасность травмирования рук работающих».

При обследовании защитного устройства рабочей зоны прессы установлено:

– расстояние между прутьями передней решетки 8 (рис. 3) составляет 40 мм, что не соответствует требовани-

ям эксплуатационной документации (не более 30 мм (см. рис. 2));

– в передней решетке имеется окошко 118×142 мм, через которое возможен доступ рук штамповщика в зону работы штампа, что не соответствует ГОСТ 12.2.062-81 «... смотровые окна

не должны уменьшать защитную функцию ограждения»;

– боковые ограждения 9 выполнены из листовой стали, что не соответствует эксплуатационной документации (в качестве бокового ограждения предусмотрена боковая защитная решетка (см. рис. 2)).

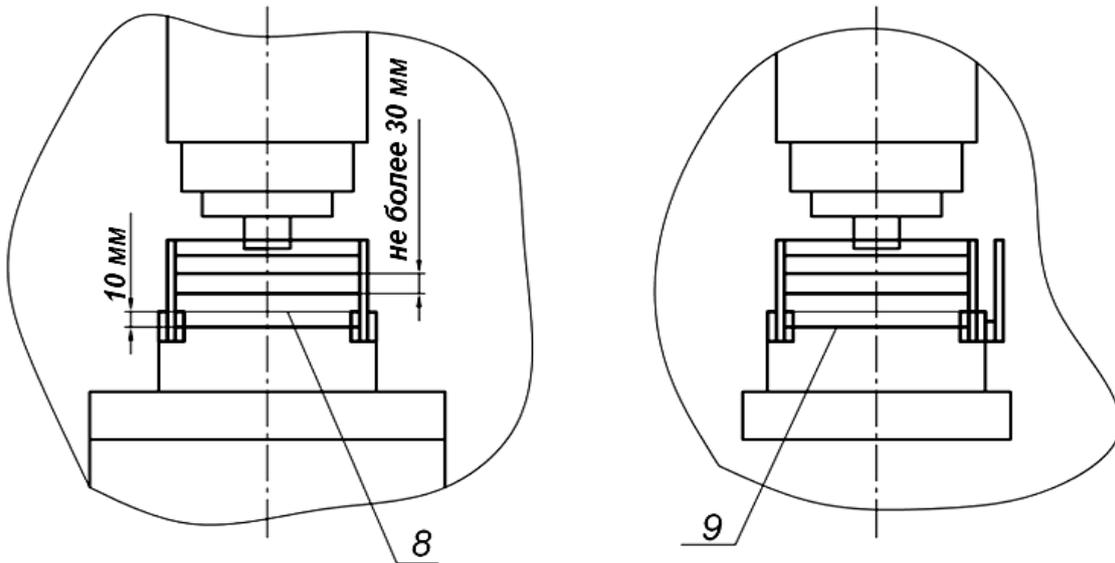


Рис. 2. Схема защитного устройства по эксплуатационной документации

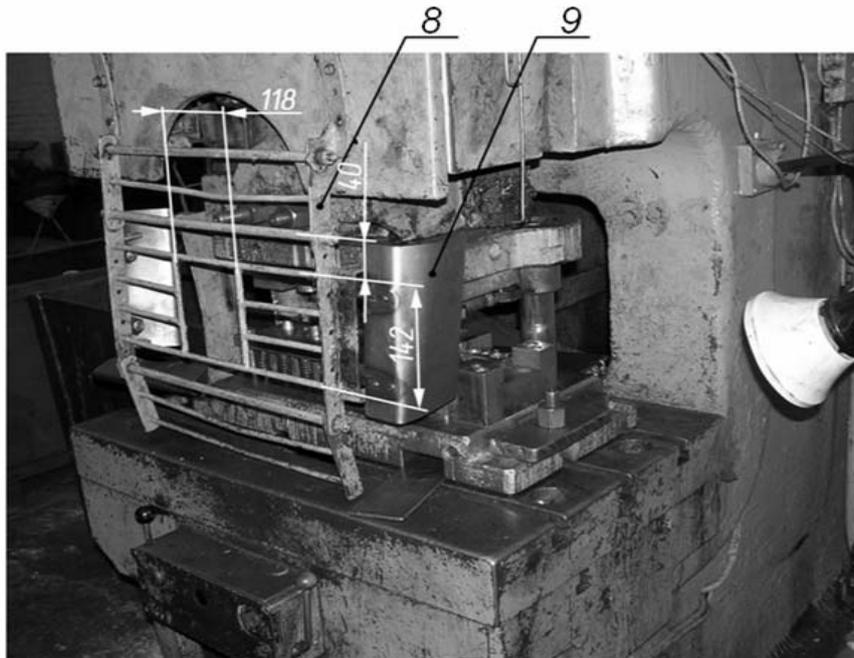


Рис. 3. Вид ограждения зоны штампа прессы

Причиной несчастного случая явилось то, что защитное ограждение штампового пространства обследуемого прессы К-2130А, заводской № 685, инвентарный № 40426, не соответствует требованиям эксплуатационной документации, ГОСТ 12.2.109-89 и ГОСТ 12.3.026-81, т. к. оно допускает возможность попадания рук в рабочую зону штампа.

2. Штамповщик 3 разряда участка холодной штамповки цеха по производству запасных частей общества с ограниченной ответственностью (ООО) «Спутник», расположенного в Могилеве, изготавливал партию деталей «фланец чехла». Упомянутая деталь изготавливалась в штампе последовательного действия, установленном на прессе модели КЕ-2130А, из заготовки полосы 0,8×75×100 мм листовой стали. Штамповка производилась пооперационно, последовательными одиночными ходами включения педаля прессы штамповщиком. Во время работы штамповщик травмировал правую руку в штампе прессы. С его слов, произошло самопроизвольное включение хода ползуна прессы.

По представленной на экспертизу технической документации на пресс установлено, что обследуемый пресс однокривошипный, простого действия, открытый ненаклонным усилием 1000 кН, модели КЕ-2130А, заводской № 1977, изготовлен в 1997 г. АО «Барнальским заводом механических прессов» и смонтирован в цеху по производству запасных частей ООО «Спутник».

Для быстрого останова ползуна пресс оснащен пневматическими муфтой-тормозом и тормозом маховика. Муфта-тормоз У3411 снабжена пневмораспределением, которое исключает возможность хода ползуна прессы при его неисправности. Пресс также снабжен уравнивателем ползуна, который исключает возможность опускания ползуна при неисправном тормозе, что

соответствует ГОСТ 12.2.113-86.

На прессе предусмотрены следующие режимы работы:

– «Непрерывные ходы» – управление кнопками «Ход» на пульте управления;

– «Одиночный ход» – управление двуручные кнопки «Ход» на пульте управления;

– «Одиночный ход» – управление педалью;

– «Голчок» – управление кнопками «Ход» на пульте управления;

– «Ручной проворот» – управление ручным проворотом маховика при помощи воротка (при отключенном двигателе главного привода и остановившемся маховике).

При этом ручная штамповка из листа и полосы в режиме «Одиночный ход» с управлением педалью должна производиться только «при наличии защиты штампового пространства». Это обуславливается и требованиями ГОСТ 12.2.113-86 «... прессы, имеющие однуручную или педальную систему управления, должны оснащаться защитными устройствами опасной зоны или инструмента».

Для обеспечения защиты штампового пространства при режимах работы «Непрерывные ходы» и «Одиночный ход» с управлением педалью на прессе было предусмотрено устройство защитное механическое УЗМ4-100 (рис. 4).

Оно выполнено в виде переднего защитного кожуха 3, изготовленного из листового металла и закрепленного на дверцы 1 ограждения ползуна и двух боковых откидных решеток 4 и 5, прикрепленных к станине. Защитное устройство посредством конечного выключателя 2 заблокировано с педалью включения прессы, что соответствует ГОСТ 12.2.113-86.

При проведении экспертизы установлено, что на прессе КЕ 2130А, заводской № 1977, защитное устройство штампового пространства отсутствовало.

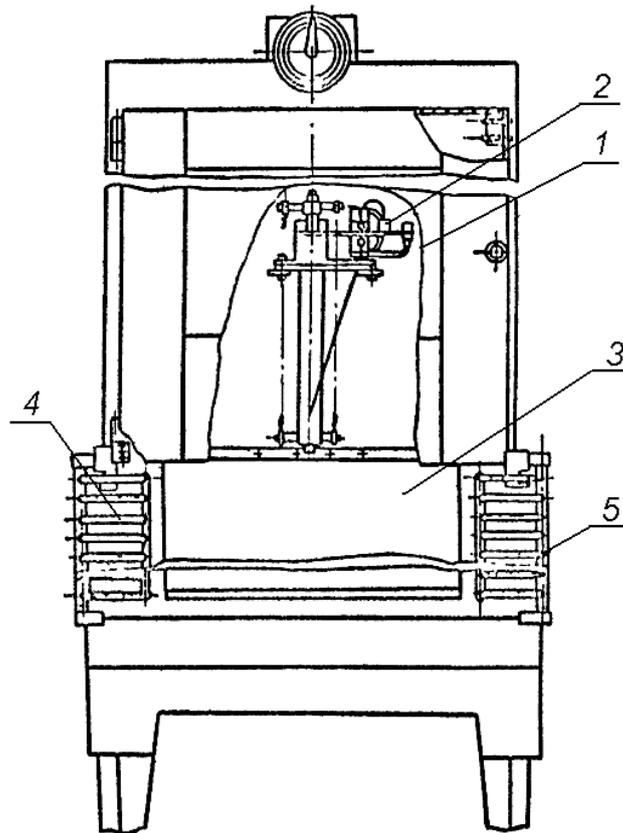


Рис. 4. Ограждение рабочей зоны штампа

Причинами изложенного несчастного случая явились:

- отсутствие защитного устройства штампового пространства;
- ошибка штамповщика, давшего педалью управления сигнал на включение ползуна прессы в момент, когда его рука находилась в опасной зоне.

3. Штамповщик заготовительно-прессового цеха (ЗПЦ) открытого акционерного общества ОАО «Бобруйскагромаш» при снятии руками детали со штампа, установленного на рабочем столе прессы КБ 8342 Б, получил травму с тяжелым исходом. При этом управление прессом (включал рабочий ход нажатием на кнопки пульта двурукого управления) осуществлял другой штамповщик (рис. 5).

При проведении экспертизы установлено следующее:

- пресс 1 КБ 8342 Б, инв. № 01575, установлен в ЗПЦ (рис. 6), снабжен стационарно смонтированным шкафом управления 2 и переносным пультом двурукого управления 3;

- при получении травмы штамповщик осуществлял снятие детали руками со штампа.

Согласно технологическому процессу упомянутые детали должны изготавливаться одним штамповщиком при ручной подаче заготовки в штамп (рис. 7) и двуруком включении прессы. Это соответствует требованиям ГОСТ 12.2.109-89 «... укладывание заготовок в рабочую зону штампа и удаление отштампованных деталей и отходов вручную без применения вспомогательного инструмента допускается только при наличии на прессах эффективных защитных устройств (двурукого включения)».

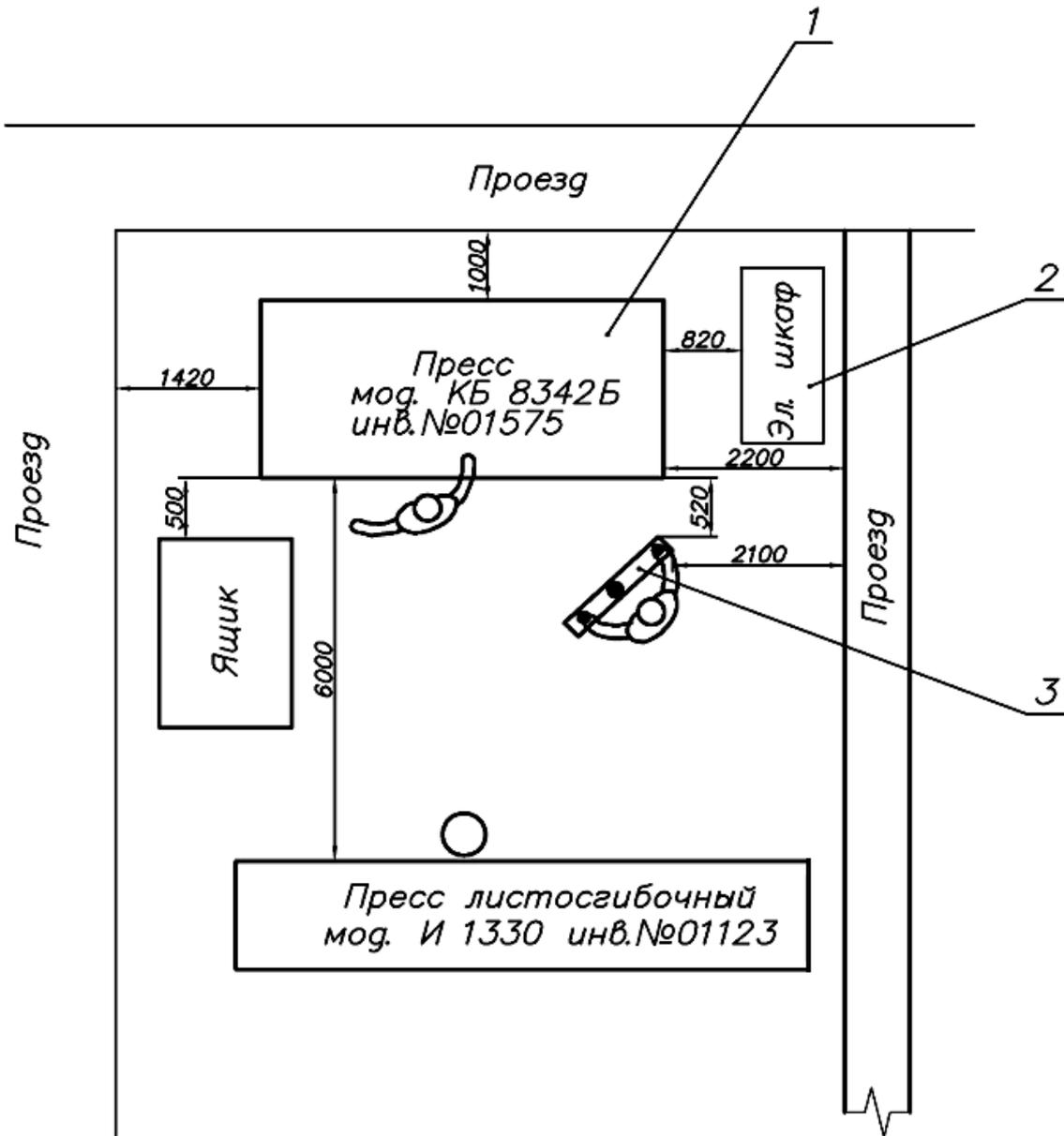


Рис. 5. Схема расположения рабочих во время несчастного случая

Переносной пульт управления прессом 3 (рис. 8) содержал две грибовидные кнопки 4 и 5, «ход» двурукого управления, расположенные по краям панели, и кнопку «общий стоп» 6, расположенную на середине панели пульта. Переносной пульт управления 3 был связан со шкафом управления 2 гибким рукавом 7.

Режим работы пресса «Одиночные ходы» при двуруком управлении, в от-

личие от кнопок, расположенных на переносном пульте управления, является одним из штатных режимов работы пресса, предусмотренных эксплуатационной документацией.

При этом режиме «...пресс совершает одиночные ходы с остановкой в верхней мертвой точке после каждого рабочего хода. Защита рук оператора осуществляется необходимостью одновременного нажатия обеих кнопок

управления и удержания их до прохода ползуна через нижнюю мертвую точку. После каждого рабочего хода необхо-

димо отпускать кнопки, иначе следующего хода не будет».

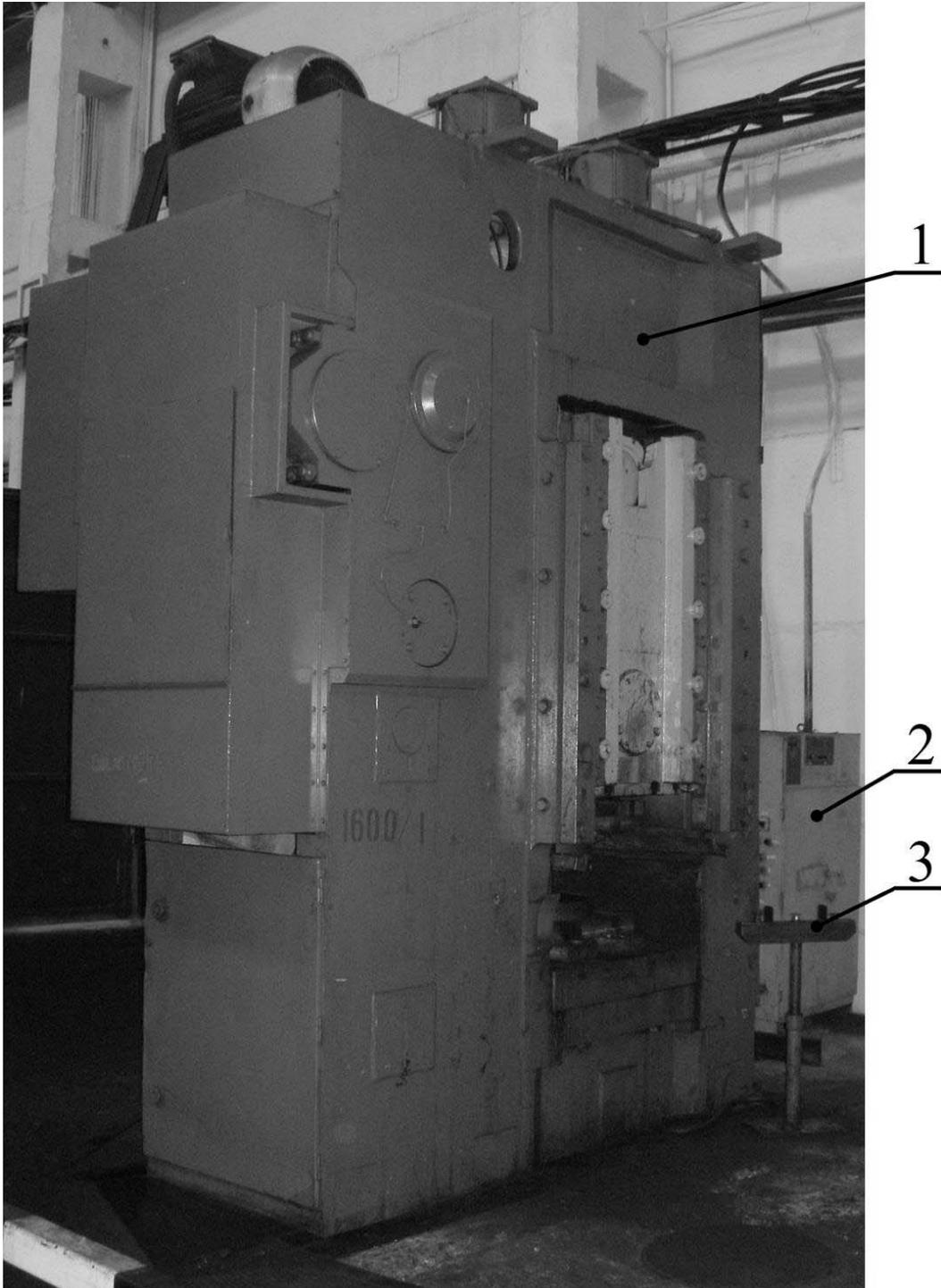


Рис. 6. Общий вид пресса КБ 8342 Б

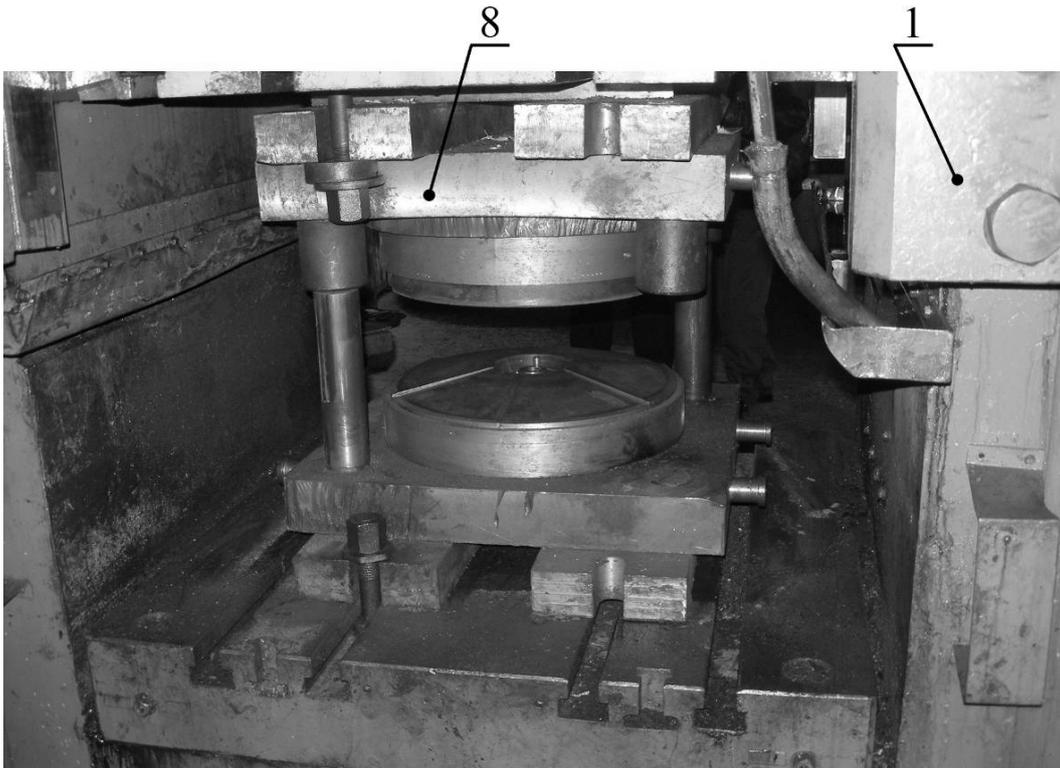


Рис. 7. Вид штампа, на котором произошел несчастный случай

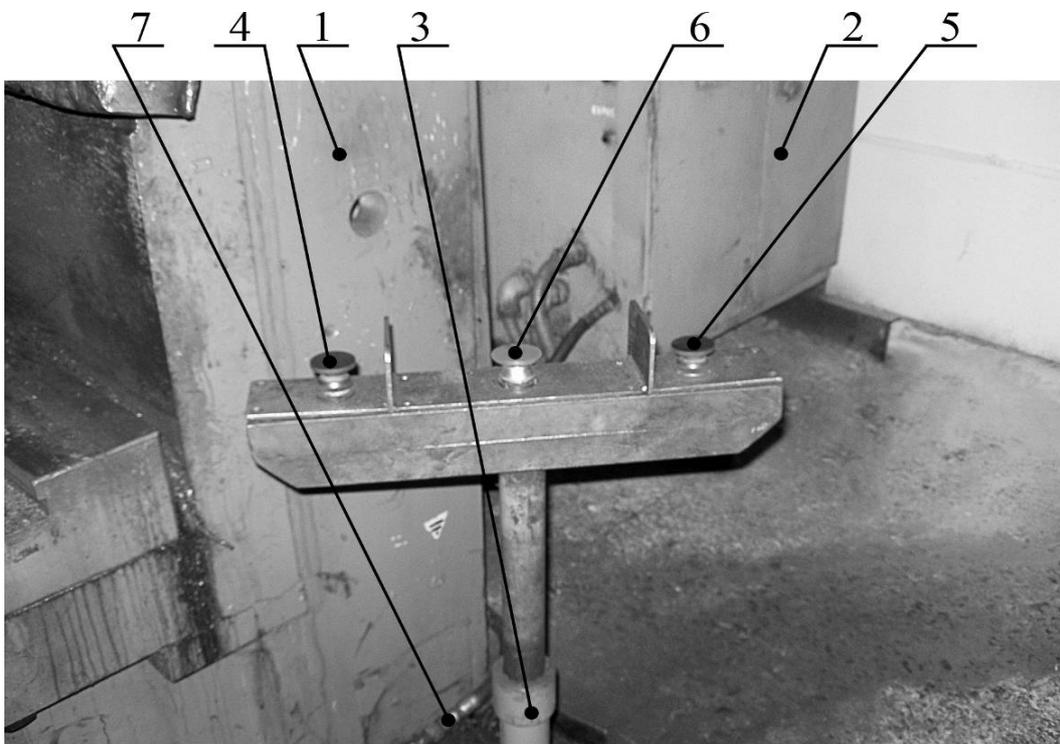


Рис. 8. Вид переносного пульта двуручного управления прессом

Упомянутый режим соответствует требованиям безопасности по ГОСТ 12.2.109-89, ГОСТ 12.2.017-93, ГОСТ 12.2.113-86.

Причиной несчастного случая явились нарушения штамповщиками инструкции по охране труда, технологического процесса и требований эксплуатационной документации, выразившиеся в работе на прессе двух штамповщиков.

Анализ изложенных несчастных случаев с тяжелым исходом показывает, что два из них произошли по причине невыполнения требований безопасности по ограждению штампового пространства прессы. Так, на прессе КЕ-2130А, эксплуатируемом в ООО «Спутник»,

ограждение штампового пространства, предусмотренное технической документацией УЗМ4-100, отсутствовало, а на прессе К-2130А, эксплуатируемом в ЧУП «Универсал-Бобруйск», ограждение штампового пространства не соответствовало требованиям технической документации, т. к. допускало возможность попадания рук штамповщика в зону работы штампа. Третий несчастный случай произошел из-за нарушений штамповщиками технологического процесса и инструкции по охране труда, выразившихся в режиме работы прессы «Одиночные ходы» на открытом штампе при двуруком управлении кнопками и ручной подаче заготовок в штамп.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 10.03. 2011

**S. D. Haliuzhyn, V. M. Puskova,
M. I. Rutskiy**
**The analysis of accidents at punching
of sheet metal**

The results of the analysis of three serious accidents at the enterprises of the Mogilev area at punching of sheet metal are presented in the paper. Two out of the considered accidents were the result of failure to implement safety requirements on an enclosure of punching press space and one of them occurred because the puncher failed to carry out the manufacturing process and broke labour safety instructions.

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 338.24

Т. Л. Крупенько, В. А. Широченко, канд. техн. наук, доц.

МЕТОДИКА МАКСИМИЗАЦИИ ПРИБЫЛИ ТОРГОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В статье приводится методика оперативного управления торговой наценкой предприятия, занимающегося розничной торговлей. Использование данной методики позволяет устанавливать дифференцированные уровни торговой надбавки по всей номенклатуре продукции, что способствует максимизации прибыли торгового предприятия. Причём достигается максимизация прибыли не только в краткосрочном периоде, но и в долгосрочной перспективе, так как представленная методика учитывает не только изменение внутренних факторов предприятия, но и постоянно изменяющиеся факторы рыночной среды.

Каждая коммерческая организация в процессе своей деятельности стремится получать прибыль. Важным моментом является то, что деятельность предприятия направлена не на накопление прибыли в денежной форме, а на её расходование на инвестиции и инновации.

Прибыль занимает одно из центральных мест в общей системе стоимостных показателей и рычагов управления экономикой. Она является мерилем оценки деятельности предприятия, источником его развития, самофинансирования, материального поощрения труда работников, выступает источником вознаграждения владельцам акций, паев в уставном капитале предприятия, пополнения государственного и местных бюджетов. Итак, прибыль – это основной многозначный оценочный показатель результатов работы предприятия в условиях становления и развития рыночного механизма хозяйствования.

Развитие предприятия возможно лишь при наличии достаточной величины прибыли, полученной от его предпринимательской деятельности. Таким образом, целесообразно направлять усилия специалистов организации на

разработку мероприятий, которые обеспечат устойчивый рост прибыли, а следовательно, улучшат финансовое состояние и платёжеспособность предприятия.

Так как увеличение прибыли торгового предприятия может быть достигнуто максимизацией валового дохода предприятия и минимизацией издержек обращения, то особое внимание необходимо уделить разработке методики, позволяющей проводить предприятию гибкую ценовую политику и в результате получать планируемую величину валового дохода.

Валовой доход как экономическая категория представляет собой часть стоимости товара, которая предназначена для покрытия издержек обращения и образования прибыли. Валовой доход является показателем, характеризующим прямую эффективность работы предприятия. От величины валового дохода зависят финансовое положение торгового предприятия, оплата труда работников, поскольку он является источником образования прибыли.

Целью научно обоснованного прогноза валового дохода является опреде-

ление возможного его объема при заданных (прогнозных) ограничениях. Исходя из целевых приоритетов, выбранных торговым предприятием для своей деятельности, в данном случае это торговая надбавка. В настоящее время торговую надбавку субъекты хозяйствования могут формировать самостоятельно с учетом конъюнктуры потребительского рынка, условий своей хозяйственной деятельности, уровня цены производителя и других факторов. И несмотря на то, что при установлении уровня торговой надбавки фирма учитывает цену производителя, всё же торговая организация обладает свободой действий при осуществлении своей ценовой политики. Это связано с тем, что Постановление Минэкономики Беларуси от 19 августа 2009 г. № 141 отменяет ограничение торговых надбавок на большинство товаров. Так, при высоких ценах, предложенных производителем, торговое предприятие может предусмотреть низкий уровень торговой надбавки. И, наоборот, закупив у производителя продукцию по низким ценам, торговая организация может установить высокие торговые надбавки, если это не интуитивное решение руководителя, а хорошо продуманные действия, которые опираются на полную и достоверную информацию о спросе на данную продукцию и ценах конкурентов.

Причем ценовая политика организации должна обладать высокой степенью гибкости, и должны разрабатываться мероприятия по обеспечению оперативной корректировки дифференцированных уровней торговой надбавки по всей номенклатуре реализуемых товаров в зависимости от изменения ситуации на потребительском рынке и условий хозяйствования.

Существует много методов определения базовой торговой надбавки, которые можно использовать независимо друг от друга или в комбинации друг с другом. Наиболее эффективным является

метод оптимизации торговых надбавок, т. к., этот метод основан на учете рыночных условий, политики оптовой розничной фирмы, вида товара, практики (опыта) фирмы. В соответствии с этим предприятие определяет, какой доход оно хотело бы получить при реализации данного товара.

В поставленной оптимизационной задаче критерием оценки является плановый валовой доход торгового предприятия, а управляемым параметром – изменение торговой наценки по сравнению с прошлым периодом в процентах.

В качестве объекта исследования выбрано торговое предприятие. Розничную торговлю данной организации представляют несколько групп товаров. Тщательный анализ необходимо проводить по группе продукции, которая занимает наибольший удельный вес в розничном товарообороте. По данным товарам целесообразно осуществлять непрерывный сбор и накопление информации, необходимой для осуществления хорошо продуманной ценовой политики. Это позволит устанавливать дифференцированные уровни торговой надбавки в разрезе всей номенклатуры товаров и получать планируемую величину валового дохода.

Для решения поставленной задачи создана программная система, работа которой позволила автоматизировать процесс управления торговой наценкой; также с ее помощью могут быть определены валовой доход по всей номенклатуре продукции и рекомендуемая цена.

Принцип работы разработанного программного обеспечения заключается в следующем: анализируется товарооборот по каждому виду товаров за некоторый период времени, далее по удельному весу каждого товара в общем товарообороте происходит формирование по группам.

Первая группа представляет собой ту продукцию, которая пользуется наибольшим спросом у покупателей доста-

точно долгое время, её удельный вес в общем товарообороте составляет до 50 %. На данные товары предполагается увеличивать торговую надбавку. В зависимости от того, какой профиль деятельности выбрало торговое предприятие, в качестве товаров, подлежащих формированию по группам, могут выступать коллекции плитки керамической, коллекции женской или мужской одежды и т. д. Обычно коллекции, которые входят в первую группу, являются наиболее модными и рассчитаны на покупателей с высокими доходами. Существует очень низкая вероятность того, что торговое предприятие потеряет данных клиентов при увеличении цен на коллекции первой группы. Такая категория покупателей готова платить более высокую цену за товары высокого качества и товары, которые отвечают последним тенденциям моды.

Вторая группа, так называемая «тестовая группа», имеет удельный вес в общем товарообороте до 40 %. По мнению экспертов, на коллекции данной группы следует торговую наценку оставить прежней (на уровне предыдущего периода), т. к. эти коллекции занимают достаточно большой удельный вес в товарообороте и рассчитаны на покупателей со средним достатком, которым не слишком принципиальны модные тенденции. Повышение цен на данные коллекции может привести к тому, что покупатели предпочтут товар конкурентов. Если на протяжении некоторого времени объемы продаж по какой-либо коллекции из этой группы увеличатся, то она может перейти в первую группу; примером таких коллекций могут служить вновь появившиеся коллекции, которые еще не нашли своего покупателя.

Третью группу составляют коллекции – неликвиды, их удельный вес в товарообороте всего лишь 10 %. Эти коллекции плохо пользуются спросом, и для того чтобы их распродать и привлечь покупателей, необходимо снизить

торговую наценку. Предполагается скидка на 5 %, т. к. по мнению психологов, покупателями воспринимается скидка в размере 5...10 % от цены. В связи с тем, что в эту группу входит большое количество наименований товаров, то психологически на покупателей, которые находятся в торговой точке, будет оказывать воздействие большое количество скидок, что создаст впечатление более низких цен по сравнению с ценами конкурентов. Но т. к. удельный вес данных товаров в товарообороте торгового предприятия незначителен, то предоставление скидок не нанесёт ущерба деятельности фирмы. Снижение цен на товары данной группы приведёт к активизации спроса на эту продукцию, а при правильном установлении цен на товары первой и второй групп можно достигнуть не только сохранения величины валового дохода (несмотря на предоставление скидок), но даже его увеличения.

Таким образом, суть решения задачи состоит в том, чтобы выручкой от товаров первой группы покрыть потери валового дохода при снижении цены на коллекции третьей группы, тем самым обеспечить плановый валовой доход. Для достижения этой цели были ограничены пределы изменения торговой наценки на коллекции второй группы ($\Delta TH_i = 0 \%$) и третьей группы ($\Delta TH_i = -5 \%$), а изменение наценки на коллекции первой группы является управляемым параметром. При этом, по мнению экспертов, торговая наценка не должна превышать 50 %.

Успешное функционирование торгового предприятия возможно лишь тогда, когда при формировании розничных цен на свою продукцию оно оперативно реагирует на изменение внутренних условий и факторов внешней среды. Одним из внешних факторов, оказывающих влияние на формирование уровня торговой надбавки, выступает конкуренция. В зависимости от выбранной конкурентной стратегии фирма

стремится обеспечить себе либо лидерство по ценам, либо ориентируется на средний уровень цен конкурентов.

В первом случае добавлять дополнительные ограничения в модель нет необходимости, и пределы изменения торговой наценки на коллекции первой группы могут устанавливаться экспертами предприятия в зависимости от их видения текущего положения фирмы на рынке.

Вторая стратегия является преобладающей. Стремясь поддерживать цены на более низком уровне, чем у конкурентов, предприятия торговли устанавливают соответствующий уровень торговых надбавок, осуществляя режим экономии издержек для того, чтобы

возместить расходы и иметь возможность получить прибыль. В этом случае в модель необходимо ввести ограничения на изменение торговых надбавок на коллекции первой группы, тем самым предусмотрев, чтобы цены на эти товары в результате корректировок наценок не оказались выше цен конкурентов на аналогичную продукцию.

Так, на основе информации о деятельности торгового предприятия за некоторый период времени (например, за четыре месяца) производится (по вышеизложенной методике) формирование коллекций по трём группам (результаты представлены на рис. 1).

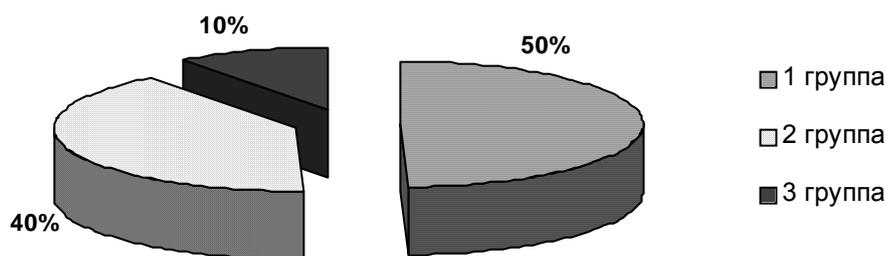


Рис. 1. Формирование товаров торгового предприятия по группам

Корректировка торговых наценок может осуществляться каждый месяц. При этом после поступления новой информации по товарообороту за последний месяц будет осуществляться пересчет удельного веса каждого товара в общей величине товарооборота предприятия и в соответствии с этим – новое формирование товаров по группам. В результате, если на какой-либо товар из первой группы объем реализации уменьшился, то в плановом периоде он уже попадет во вторую группу с более низкой величиной торговой надбавки. Аналогично происходит переход това-

ров из второй группы в первую, если товарооборот по данным товарным позициям устойчиво растёт. Такая же ситуация будет наблюдаться и с товарами третьей группы, которые при увеличении их вклада в товарооборот предприятия могут перейти во вторую и даже в первую группу (и соответствующим образом будет изменена величина их торговых надбавок).

Такой способ регулирования уровня торговой надбавки совместим с утверждением, что при определении величины наценки целесообразно учитывать стадию жизненного цикла продукции.

На этапе внедрения нового товара на рынок уровень торговой надбавки устанавливается минимальным и продажа зачастую бывает убыточной. На этапе подъема уровень торговой надбавки возрастает и соответственно растет объем валового дохода. Наиболее высокая торговая надбавка формируется на стадии зрелости, когда объем продажи максимален. Этап ухода товара с рынка сопровождается падением уровня торговой наценки и значительным уменьшением валовых доходов. В соответствии с этим товары, жизненный цикл которых находится на стадии зрелости, попадут в разработанной модели в первую группу, на этапе подъема – во вторую, а на стадии внедрения и ухода с рынка – в третью группу.

После формирования коллекций по группам и определения предела изменения торговой наценки по каждой группе следует спрогнозировать объемы продаж в натуральном выражении для каждой коллекции на будущий период, т. е. необходимо определить спрос на продукцию торгового предприятия.

Определение спроса – важный этап установления цены. Его нельзя устранить или отложить, т. к. совершенно невозможно рассчитать цену, не изучив спрос на данный товар. Спрос – это форма выражения потребности, обеспеченной денежными средствами. По отношению к спросу потребность является первичной и определяет его содержание и развитие, т. е. спрос является внешним проявлением потребности. В отличие от потребности спрос конкретен и обладает количественной и качественной определенностью. Количественная величина спроса на товары измеряется в денежном выражении, а в более детальном структурном разрезе может выражаться и в натуральных показателях.

Процесс изучения спроса в розничной торговле представляет собой сбор, обработку и анализ необходимой

информации для стратегических, тактических и оперативных решений по развитию производства товаров народного потребления, а также по их закупке и продаже. В розничной торговле этой работой должны заниматься, в определенной степени, все специалисты, занятые закупкой и продажей товаров. Собранный информация должна аккумулироваться, обобщаться и систематизироваться. Изучение спроса – непрерывный процесс. С одной стороны, изучение спроса населения предшествует формированию ассортимента товаров, а с другой – следует за ним с целью выявления соответствия ассортимента предъявленному спросу.

Поскольку потребители в выборе товара руководствуются своими доходами, то в качестве характеристики этого показателя целесообразно использовать информацию о заработной плате, которую можно получить из статистических сборников. С помощью методики анализа динамических рядов можно осуществить прогноз спроса на интересующий период.

Для торгового предприятия строится модель зависимости спроса на товар от реальной заработной платы потребителей региона. На первом этапе осуществляется анализ реальной заработной платы граждан соответствующего региона Республики Беларусь, в котором функционирует фирма, за несколько лет по месяцам.

Для решения этой задачи нужно из исходного динамического ряда выделить тренд и сезонность. Под трендом понимается непериодическая системная (неслучайная) составляющая, характеризующая общую тенденцию изменения временного ряда. Сезонность является периодической системной составляющей, т. е. ее значения повторяются через определенный период времени. Помимо сезонности и тренда, исходный временной ряд может содержать и другие системные составляющие. В полном объе-

ме методика прогнозирования должна исследовать следующее разложение:

$$Y = Y_t^{\text{Tp}} + Y_t^{\text{Cез}} + Y_t^{\text{E}}, \quad (1)$$

где Y_t^{Tp} – тренд; $Y_t^{\text{Cез}}$ – сезонность; Y_t^{E} – случайная компонента.

Для выявления трендовой, циклической компонент используются коэффициент автокорреляции уровней ряда и автокорреляционная функция. Автокорреляционная функция – это последовательность коэффициентов автокорреляции уровней первого, второго и последующих порядков. График зависимости значений автокорреляционной функции от величины лага (порядка коэффициента автокорреляции) – коррелограмма.

Порядок коэффициентов автокорреляции определяет временной лаг: первого порядка (при $\tau = 1$), второго порядка (при $\tau = 2$) и т. д. Анализ автокорреляционной функции и коррелограммы позволяет определить лаг, при котором автокорреляция наиболее высокая. Если наиболее высоким оказался коэффициент автокорреляции первого порядка, исследуемый ряд содержит только тенденцию. Если наиболее высоким оказался коэффициент автокорреляции порядка τ , то ряд содержит циклические колебания с периодичностью в τ моментов времени.

С помощью прикладного программного обеспечения, например, пакета Statistica, получается уравнение тренда, отражающее изменение реальной заработной платы с течением времени. Для этих целей целесообразно использовать линейную регрессию, т. к. поведение этой функции отвечает характеру изменения реальной заработной платы граждан Республики Беларусь наилучшим образом.

$$Z_t = a_0 + a_1 t, \quad (2)$$

где a_0, a_1 – параметры уравнения регрес-

сии, определяемые с помощью метода наименьших квадратов; t – период времени; Z_t – значение реальной заработной платы населения соответствующего региона Республики Беларусь.

Критерием отбора наилучшей формы тренда является наибольшее значение скорректированного коэффициента детерминации R^2 .

Построив уравнение тренда, проводится оценка его надежности. Это делается посредством критерия Фишера F . $F_{\text{факт}}$ сравнивается с $F_{\text{теор}}$ при $v_1 = (k - 1)$, $v_2 = (n - k)$ степенях свободы и уровне значимости α (обычно $\alpha = 0,05$), где k – число параметров функции, описывающей тенденцию; n – число уровней ряда. Если $F_{\text{факт}} > F_{\text{теор}}$, то уравнение регрессии значимо, т. е. построенная модель адекватна фактической временной тенденции.

На основе построенной модели производится точечный прогноз реальной заработной платы граждан региона на предстоящий период путем подстановки в уравнение тренда соответствующего значения фактора времени t .

На втором этапе в разрезе товарной номенклатуры строятся регрессионные модели, которые показывают связь между спросом на данные товары и реальной заработной платой населения. С помощью пакета Statistica можно получить коэффициенты уравнений регрессии и провести оценку их надежности. Зависимость спроса на товар Y от реальной заработной платы x можно описать следующим образом:

$$N = b_0 + b_1 x, \quad (3)$$

где N – объем реализации товара в натуральном выражении; x – величина реальной заработной платы населения соответствующего региона; b_0, b_1 – параметры уравнения регрессии, определяемые с помощью метода наименьших квадратов.

Для получения данного уравнения, помимо информации о реальной зара-

ботной плате, необходимо использовать данные об объемах реализации товара в

натуральном выражении за некоторый период времени по месяцам (рис. 2).

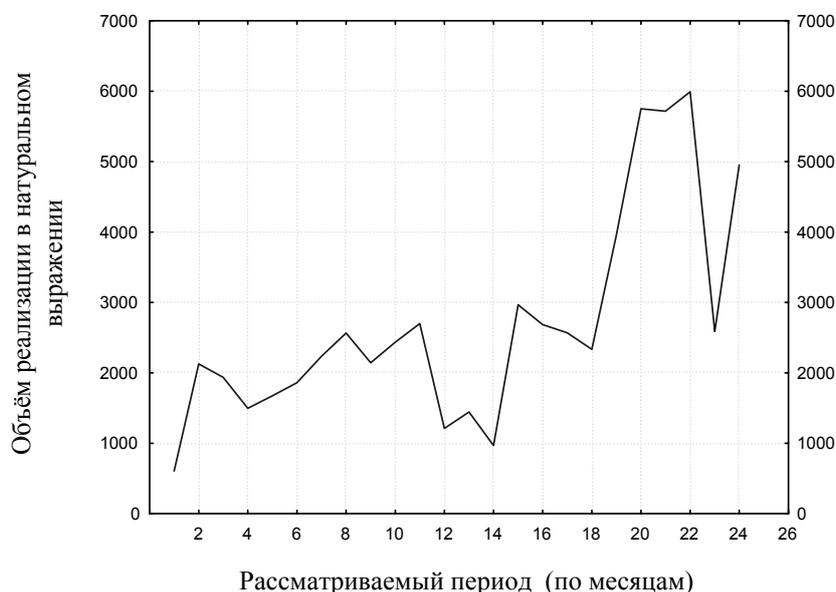


Рис. 2. Динамика объема реализации товара в натуральном выражении

Но, как видно из рис. 2, связь между реальной заработной платой и спросом иногда может быть установлена затруднительно, т. к. изменение объема реализации товара по месяцам может иметь неустойчивый характер – уровни динамического ряда могут то возрастать, то убывать в рассматриваемом периоде. Для решения этой проблемы необходимо провести сглаживание динамического ряда (рис. 3), после чего и строится регрессионная модель.

На третьем этапе на основании полученных уравнений регрессии составляется прогноз спроса на товары на планируемый период по месяцам.

Следующим этапом (после формирования товаров по группам, установления предела изменения торговой наценки по каждой группе и расчета прогнозируемого объема продаж в натуральном выражении для каждой коллекции на будущий период) является определение планируемой величины валового дохода предприятия исходя из установленного

экспертом предприятия планового темпа роста валового дохода. К этой величине будет стремиться значение целевой функции в процессе решения поставленной оптимизационной задачи.

Для решения данной задачи в разработанной программной системе предусмотрен модуль, в котором с помощью функции «Поиск решения» пакета Microsoft Excel происходит определение оптимальной величины торговой наценки по каждому наименованию товара на предстоящий период. В соответствии с полученной торговой наценкой устанавливается розничная цена, по которой покупатели смогут приобрести товар в торговой точке. Реализация продукции по данным ценам позволит торговому предприятию увеличить валовой доход, а следовательно, прибыль.

Аналогичные расчеты производятся для каждого последующего месяца при поступлении новой информации по товарообороту и валовому доходу за предшествующий период.

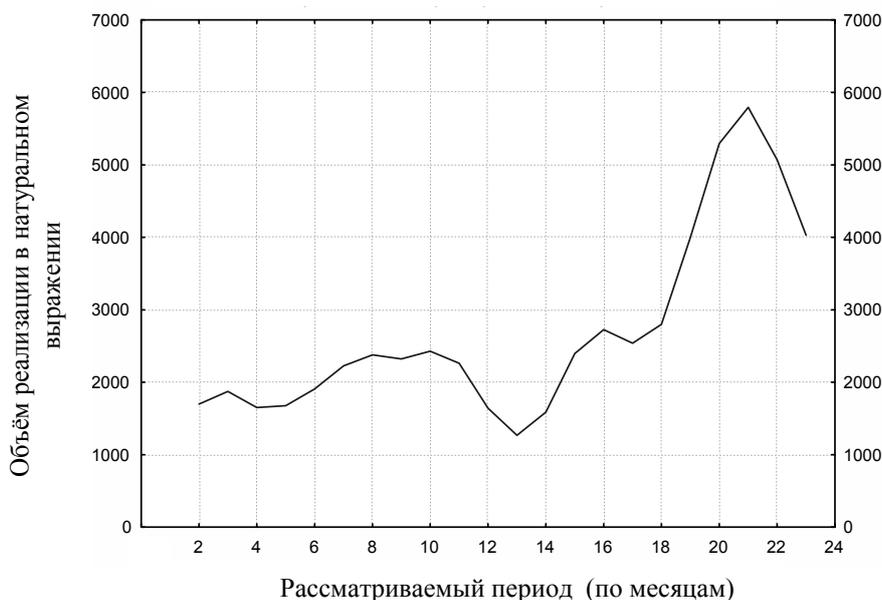


Рис. 3. Сглаженный динамический ряд

Использование данной методики позволит торговому предприятию оперативно реагировать на изменение рыночной ситуации, обоснованно вносить изменения в свою ценовую политику по мере поступления новой информации о спросе, конкурентах, ценах производителей и других факторах. В настоящее время предприниматели в большей степени действуют интуитивно, без научного обоснования своих действий, вследствие чего совершается большое количество ошибок, ведущих к возникновению кризисных ситуаций.

Созданный эффективный инстру-

мент, представляющий собой программное обеспечение на языке Visual Basic for Application, позволит предприятию значительно ускорить трудоёмкий процесс принятия решений в области управления ценовыми факторами и избежать ошибок в расчётах. Разработанное программное обеспечение, в котором реализована вышеизложенная методика, передано для использования одному из торговых предприятий, где и проводится оценка эффективности его применения при управлении торговой наценкой.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 18.03.2011

T. L. Krupenko, V. A. Shirochenko
Technique of profit maximization
of trade enterprise

The technique of efficient margin administration of the enterprise in the retail trade is presented in the article. Use of the given technique allows establishing differentiated levels of the margin for the product mix, which favours the profit maximization of the trade enterprise. Profit maximization is achieved both in the short-term period and long-term outlook as the presented technique considers both change of internal factors of the enterprise and constantly changing factors of the market environment.

УДК 338

Т. Г. Нечаева, канд. экон. наук, доц., С. Л. Комарова, Д. Д. Сакович

ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Заинтересованность предприятий в результатах своей деятельности усиливает необходимость повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции. Предложена методика оценки конкурентоспособности различных строительных материалов методом многокритериальной оптимизации с помощью функции принадлежности, а также выделена группа показателей, по которым можно оценить и охарактеризовать строительные материалы различного состава.

Конкуренция как основной механизм регулирования хозяйственного процесса является неотъемлемой составляющей рыночной экономики.

В современных экономических условиях деятельность каждого хозяйственного субъекта является предметом изучения обширного круга участников рыночных отношений, заинтересованных в результатах его функционирования. Результаты функционирования зависят в конечном итоге от конкурентоспособности продукции, работ, услуг субъекта хозяйствования.

Ряд предприятий адаптирует управленческий и торгово-технологические процессы к изменениям конкурентной ситуации, но эта адаптация носит разовый характер. Для поддержания конкурентоспособности предприятию требуется не разовый упрощенный проект, а непрерывный, системный процесс совершенствования, интегрированный со всеми структурами хозяйствования и управления.

Экономические условия, сложившиеся в результате мирового экономического кризиса, требуют основательной проработки сложившихся принципов, методов, параметров, подходов и систем измерений развития любой хозяйствующей организации и, в частности, ее конкурентоспособности в целом, но и конечно конкурентоспособности продукции как основной составляющей.

Сегодня необходима как проработка конкурентоспособности органи-

зации, так и конкурентоспособности в целом. Экономическая оценка уровня хозяйствования организаций выявляет диспропорции в развитии и факторы ухудшения конкурентоспособности, позволяет выявить резервы роста и разработать мероприятия по улучшению конкурентных позиций.

Предприятие должно иметь механизмы управления, позволяющие осуществлять адаптацию к рыночным условиям и конкуренции на мировых рынках белорусских производителей. В связи с этим выдвигается необходимость формирования на предприятиях организационно-экономических условий, позволяющих любому предприятию нормально функционировать в рыночной экономике.

Заинтересованность предприятий в результатах своей деятельности усиливает необходимость повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции, что требует совершенствования работы всех служб и подразделений субъекта хозяйствования.

Конкурентоспособность товаров раскрывается через систему ее показателей. Они представляют собой совокупность критериев количественной оценки уровня конкурентоспособности. Для потребителя наиболее значимыми являются экономические критерии. Но немалое значение имеют качественные характеристики товара. Товар с низким уровнем качества может быть конкурентоспособен при соответствующей

цене. Однако при отсутствии какого-либо свойства он потеряет привлекательность вообще.

Проведем анализ конкурентоспособности основного вида продукции предприятия ЗАО «Могилевский КСИ» – силикатных блоков, составляющих основную часть экспорта предприятия и обладающих высоким качеством.

Для оценки конкурентоспособности силикатных блоков можно выделить две группы показателей. Первая группа – это технологические характеристики товара, к которым следует отнести: класс по прочности, огнестойкость, объемную

плотность, теплопроводность, морозостойкость. И в качестве второй группы показателей необходимо выделить экономическую характеристику товара – цену одного квадратного метра плитки.

Составим сводную таблицу показателей, характеризующих блоки различных производителей (табл. 1). Из данных которой следует, что рассматриваемые образцы отличаются только по трем характеристикам – по объемной плотности, по морозостойкости и по цене. Поэтому оценка конкурентоспособности проводится именно по этим трем параметрам.

Табл. 1. Значение показателей для различных производителей блоков

Показатель	Могилевский КСИ	Сморгоньский силикатбетон	Гродненский КСИ	Оршанский КСИ
<i>1 Технологические параметры</i>				
Класс по прочности	В 1,5–5	В 2,5	В 1,5–2,5	В 1,5–2,5
Огнестойкость	Класс А1			
Объемная плотность, кг/м ³	550	500	500	500
Отпускная влажность, %	25	25	25	25
Морозостойкость, цикл	≥35	35	35	25
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,12	0,12	0,12	0,12
Удельная эффективная активность по ГОСТ 30108-94, I класс менее 370 Бк/кг	56,00	<370	<370	<370
<i>2 Экономические параметры</i>				
Цена за 1 м ² , р.	186 192	221 436	217 980	193 450

При определении конкурентоспособности продукции будем использовать метод многокритериальной оптимизации, суть которого в использовании функции принадлежности. Данная функция определена в интервале от 0 до 1 и используется в качестве безразмерной шкалы для оценки уровня параметров сравниваемой продукции. Каждому фактическому значению функции придается конкретный экономический смысл, связанный с уровнем конкурентоспособности исследуемой продукции.

Предполагаемый способ решения можно разбить на следующие этапы.

1. Задается функция принадлежности μ_i^j , значение которой характеризует степень удовлетворения блоками в i -й характеристике j -м образцом продукции. Причем если функция равна нулю, то значение i -й характеристики неудовлетворительно, а если единице, то потребность в i -й характеристике удовлетворена полностью. Любой исследуемый параметр может быть включен в функцию принадлежности и должны

быть заданы максимальные и минимальные его значения.

В данном случае за минимальное значение показателя, оценивающего технологические качества, а именно объемную плотность, возьмем 400 – при таком значении функция принадлежности равна нулю, а при 700 – единице, в то время как за минимальное значение морозостойкости возьмем 25 – при таком значении функция принадлежности равна нулю, а при 50 – единице. Принимаем минимальное значение показателя цены на уровне 250 тыс. р., а максимальное – 150 тыс. р.

2. Определяются значения выбранных показателей оценки конкурентоспособности плитки, соответствующие узловым значениям функции принадлежности, что способствует использованию данной функции для оценки па-

раметров различной размерности и порядка. Значения функции для показателей цены и технологических параметров даны в табл. 2.

3. На основе полученных значений рассчитываются коэффициенты аппроксимирующих функций для каждого показателя. Наилучший результат дает построение степенной функции 3-го порядка вида

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d . \quad (1)$$

С помощью встроенных в Excel опций (Сервис/Поиск решения) подбираются значения коэффициентов a , b , c , d для данного показателя (табл. 3 – исходные данные для расчета коэффициентов; табл. 4 – значения коэффициентов аппроксимации, полученные в результате проведенных расчетов).

Табл. 2. Параметры функции принадлежности

Шкала	Исходные данные		
	по объемной плотности, кг/м ³	по показателю морозостойкости, циклы	по показателю цены, р.
0	400	25	30
0,2	460	30	27
0,37	511	34,25	24,45
0,63	589	40,75	20,55
0,8	640	45	18
1	700	50	15

Табл. 3. Исходные данные для расчета коэффициентов аппроксимации

Исходные данные	Шкала	Значение функции принадлежности
1	2	3
Для технологических показателей (объемная плотность, кг/м ³)		
100	0	0,00
220	0,2	0,020353549
322	0,37	2,87001836
478	0,63	0,660030155
580	0,8	0,837459901
700	1	0,999999

Окончание табл. 3

1	2	3
Для технологических показателей (морозостойкость, цикл)		
8	0	0,0100
16,4	0,2	0,2100
23,54	0,37	0,3800
34,46	0,63	0,6386
41,6	0,8	0,8059
50	1	0,999999
Для экономических показателей (цена, тыс. р.)		
250	0	0,01000000
230	0,2	0,21
213	0,37	0,378929269
187	0,63	0,63589404
170	0,8	0,803310409
150	1	0,999999

Табл. 4. Значения коэффициентов аппроксимации

Коэффициент аппроксимации	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Объемная плотность	-0,000000003	0,000004174	0,000153388	-0,053721997
Морозостойкость	-0,00000026802	0,0000128566617	0,0236201063262	-0,179645450636
Цена	-0,000000007177	0,0000032713793	-0,0103293603384	2,5000193601366

Одновременно с этим строится график функции, наиболее приближенный к графику шкалы (рис. 1 – график функции принадлежности для экономических показателей; рис. 2 – для технологических показателей).

Для показателя объемной плотности функция преобразуется в вид

$$y_1 = -0,000000003x^3 + 0,000004174x^2 + 0,000153388x - 0,053721997. \quad (2)$$

Для показателя морозостойкости функция преобразуется в вид

$$y_2 = -0,00000026802x^3 + 0,0000128566617x^2 + 0,0236201063262x - 0,179645450636. \quad (3)$$

Для показателя цены функция будет иметь следующий вид:

$$y_3 = -0,00000000717734162x^3 + 0,000003271379x^2 - 0,0103293603384x + 2,5000193601366. \quad (4)$$

4. Подставляются в полученные аппроксимирующие функции значения показателей и находятся значения функции принадлежности. Значения функции для показателей объемной плотности, морозостойкости и цены блоков представлены в табл. 5.

5. Характеристики образца продукции разбиваются на технологические и экономические. Для каждой из групп находят агрегирующие функции

μ_T^j и $\mu_{ЭК}^j$, которые предполагается рассчитывать как среднее геометрическое значений функции принадлежности по отдельным признакам, т. е.

$$\mu_T^j = \sqrt[S_T]{\mu_{1T}^j \cdot \dots \cdot \mu_{S_T}^j}; \quad (5)$$

$$\mu_{ЭК}^j = \sqrt[S_{ЭК}]{\mu_{1ЭК}^j \cdot \dots \cdot \mu_{S_{ЭК}}^j}, \quad (6)$$

где μ_T^j и $\mu_{ЭК}^j$ – агрегирующие функции для технологических и экономических показателей соответственно; S_T и $S_{ЭК}$ – количество технологических и экономических показателей соответственно.

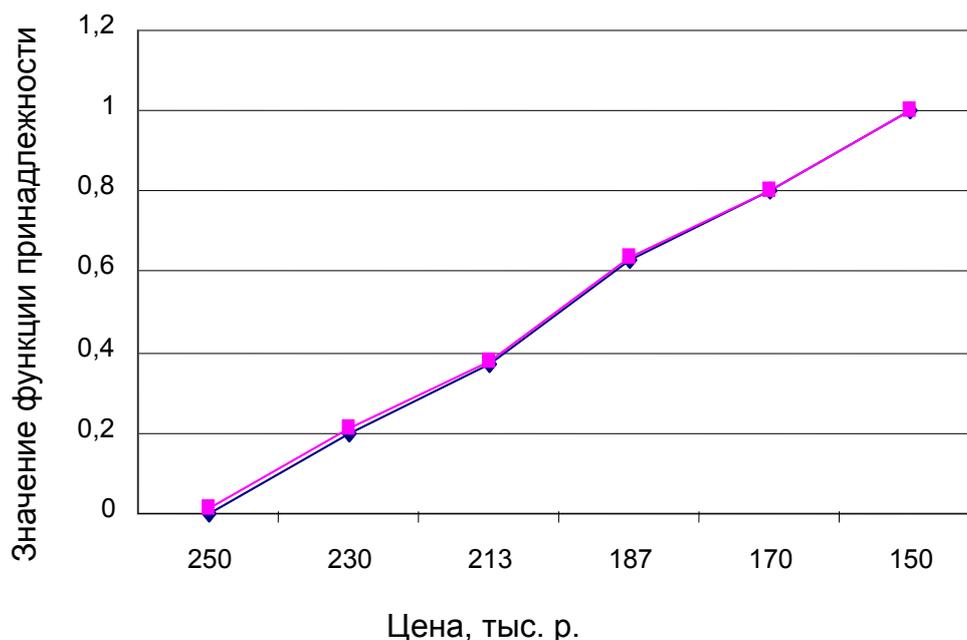


Рис. 1. График функции принадлежности для экономических показателей

Табл. 5. Значение функции принадлежности

Производитель	Значение показателя			Значение функции		
	Объемная плотность, кг/м ³	Морозостойкость, цикл	Цена за 1 м ² , р.	Объемная плотность, кг/м ³	Морозостойкость, цикл	Цена за 1 м ² , р.
Могилевский КСИ	550	35	186	0,734209795	0,6513163170256	0,6438594460601
Сморгонь-силикатбетон	500	35	221	0,646446600	0,6513163170256	0,2952087751468
Гродненский КСИ	500	35	218	0,646446600	0,6513163170256	0,3295310713795
Оршанский КСИ	500	25	193	0,646446600	0,4147048060875	0,5722715700986

Но поскольку для оценки экономических характеристик используется один показатель в каждой группе, нет необходимости рассчитывать их сред-

нее геометрическое значение, а значение агрегирующей функции по каждому производителю блоков тождественно значению функции принадлежности.

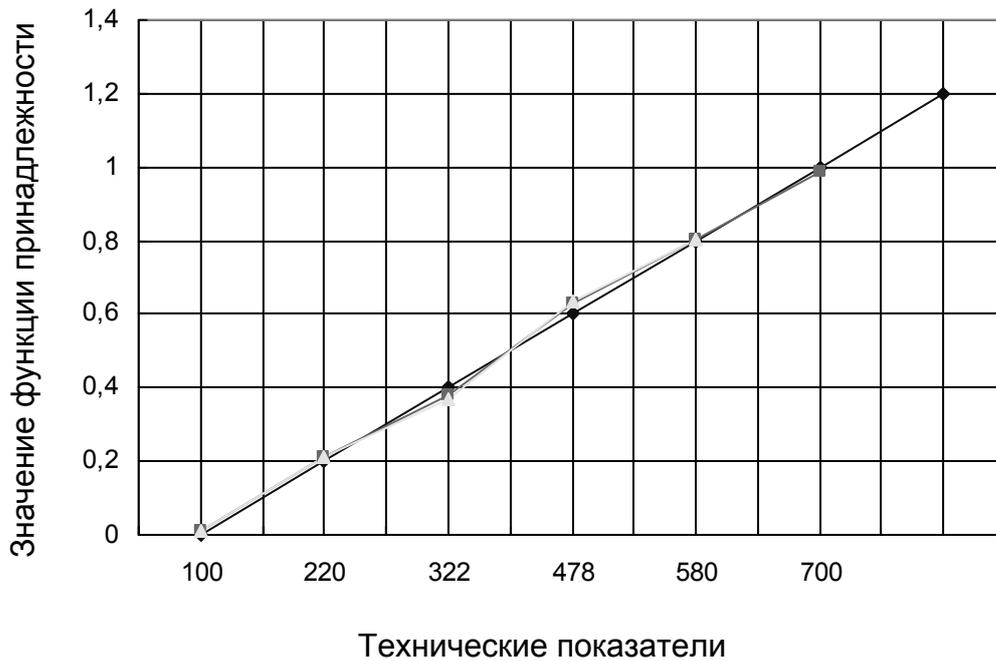


Рис. 2. График функции принадлежности для технологических показателей

6. Рассчитывается показатель конкурентоспособности как произведение агрегирующих функций:

$$\mu = \mu_T^j \cdot \mu_{ЭК}^j \quad (7)$$

Более конкурентоспособным является образец, имеющий наибольший результат. Показатели конкурентоспособности представлены в табл. 6.

Табл. 6. Расчет показателей конкурентоспособности

Производитель	$\mu_{тех}$	$\mu_{эк}$	Показатель конкурентоспособности
Могилевский КСИ	0,691522103	0,6438594460601	0,4452430383984
Сморгоньсиликатбетон	0,64887689	0,2952087751468	0,1915541519281
Гродненский КСИ	0,64887689	0,3295310713795	0,2138250967664
Оршанский КСИ	0,517768782	0,5722715700986	0,2963043538946

Из расчетов, представленных в табл. 6 можно сделать вывод, что блоки, производимые на предприятии ЗАО «Могилевский КСИ», наиболее конкурентоспособны.

Таким образом, использование данной методики позволило оценить

конкурентные преимущества продукции, обобщить результаты исследований, определить конкурентоспособность как одну из составляющих эффективности хозяйствования субъекта рыночных отношений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гриневич, М. Н.** Многокритериальная оценка конкурентоспособности предприятия / М. Н. Гриневич, Н. В. Зеленковская // Проблемы экономики и организации производственных и социальных систем : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Минск : Университетское, 2001. – С. 231.

2. **Гриневич, М. Н.** Производственная стоимость и конкурентоспособность предприятия : монография / М. Н. Гриневич, В. А. Усти-

нович, Н. В. Зеленковская. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2004. – 208 с.

3. **Лапин, Г. Н.** Оценка конкурентоспособности строительных организаций / Г. Н. Лапин // Экономика строительства. – 2000. – № 7. – С. 31–34.

4. **Родионова, Л. Н.** Оценка конкурентоспособности продукции / Л. Н. Родионова, О. Г. Кантор, Ю. Р. Хакимова // Маркетинг в России и за рубежом. – 2000. – № 1. – С. 65–77.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 31.03.2011

**T. G. Nechaeva, S. L. Komarova,
D. D. Sakovich**
**Competitiveness estimation of
building materials**

Interest of the enterprises in results of the activity strengthens the necessity to increase the competitiveness of let out production. The technique of competitiveness estimation of various building materials by a method of multi-objective optimization by means of membership function is presented in the paper. The group of indicators which make it possible to estimate and characterize building materials of various structures has been stated.

Редакционная коллегия

Главный редактор	д-р техн. наук, проф. И. С. Сазонов
Зам. главного редактора	д-р техн. наук, доц. В. М. Пашкевич
Зам. главного редактора	канд. техн. наук, доц. М. Е. Лустенков
Ответственный секретарь	В. И. Кошелева

Члены редколлегии

Д-р экон. наук, проф. Н. И. Базылев, д-р экон. наук, проф. С. И. Барановский, д-р техн. наук, проф. Э. И. Батяновский, д-р техн. наук, проф. Е. И. Берестов, д-р техн. наук, проф. Л. А. Борисенко, д-р физ.-мат. наук, проф. В. И. Борисов, д-р техн. наук, проф. С. В. Босаков, д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Гапоненко, д-р техн. наук, проф. П. Н. Громыко, д-р техн. наук, доц. А. М. Даньков, д-р техн. наук, проф. В. А. Ким, д-р техн. наук, проф. А. П. Кузнецов, д-р техн. наук, проф. В. П. Куликов, д-р техн. наук, проф. А. М. Лазаренков, д-р техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко, д-р техн. наук, проф. В. И. Луковников, д-р техн. наук, проф. В. А. Новиков, д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Редько, д-р техн. наук, доц. С. Д. Семенюк, д-р физ.-мат. наук, проф. А. Б. Сотский, д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Тарасик, д-р техн. наук, проф. В. В. Тур, д-р техн. наук, проф. Б. И. Фираго, д-р физ.-мат. наук, доц. А. В. Хомченко

Подписано в печать 23.05.2011. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать трафаретная. Усл.-печ. л. 19,3. Уч.-изд. л. 18,0. Тираж 100 экз. Заказ № 376.

Издатель и полиграфическое исполнение
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»
ЛИ № 02330/375 от 29.06.2004 г.
212000, г. Могилев, пр. Мира, 43

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2011