

ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

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

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

Периодичность – 4 раза в год

1(26) 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТ

ДУБОВИК Д. А. Оптимизация углов поворота управляемых ведущих колес мобильной машины	7
ЕМЕЛЬЯНОВИЧ И. В. Типизация, унификация, себестоимость и конкурентоспособность тракторов «Беларус».....	17
КУРИЛОВ Е. В., ЩЕРБАКОВ А. С. К вопросу эффективности косого резания грунта дисковым ножом	24
САЗОНОВ И. С., КИМ В. А., КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., СКОЙБЕДА А. Т., ЗАХАРИК А. М., БИЛЫК О. В., АМЕЛЬЧЕНКО Н. П. Эффективность использования информации о силах в алгоритмах управления торможением седельного автопоезда	33

САЗОНОВ И. С., СКОЙБЕДА А. Т., КРАСНЕВСКИЙ А. Г., КИМ В. А., БИЛЫК О. В., АМЕЛЬЧЕНКО Н. П. Моделирование движения седельного автопоезда с учетом отрыва управляемых колес тягача	38
---	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

ГАРЛАЧОВ Н. С., АНТОНОВА Е. Н. Технология пнеumoцентробежной обработки отверстий	44
ИГНАТИЩЕВ Р. М. Основные результаты исследова- ний для геометрических и кинематических расчётов синусоэксцентриковых передач.....	53
ЛОВШЕНКО Г. Ф., ЛОВШЕНКО Ф. Г., ЛОВШЕНКО З. М. Оптимизация процесса меха- нического легирования при получении высоко- прочных наноструктурных дисперсно-упрочнен- ных никелевых материалов.....	61
ЛОГВИН В. А., ЖОЛОБОВ А. А. Особенности моделирования НБВС для обеспечения точности при обработке чашечными резцами с непрерыв- но обновляющейся режущей кромкой.....	71
СУББОТИН С. П. Реализация комплекса НИОКР по совершенствованию насосов типа ГДМ для неф- тегазовой и химической отраслей	81
ТОКМЕНИНОВ К. А., ШИРОЧЕНКО В. А. Способ антикоррозионной защиты металлов мето- дом холодного цинкования	89
ХАБИБУЛЛИН А. И., ЛОВШЕНКО Г. Ф., ЛОВШЕНКО Ф. Г. Расчет предельной глубины выдавливания в заготовках из дисперсно-упроч- ненной меди	95
ХАБИБУЛЛИН А. И., ЛОВШЕНКО Г. Ф., ЛОВШЕНКО Ф. Г. Технологические особенности обработки давлением заготовок из дисперсно- упрочненной меди	104
ЦУМАРЕВ Ю. А., КУЛИКОВ В. П., ЛАТУН Т. С., РАДЧЕНКО А. А. Методики оценки механических характеристик паяных соединений при статических и динамических испытаниях	112

ШЕМЕНКОВ В. М., ЛОВШЕНКО Г. Ф. Структурные изменения в поверхностных слоях однокарбидных твердых сплавов при их обработке в тлеющем разряде.....	121
---	-----

ЯКУБОВИЧ Д. И. Влияние точности сборки на устойчивость горения дуги и геометрические размеры шва при сварке тонколистового металла.....	131
--	-----

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

АЛЯВДИН П. В., МУЗЫЧКИН Ю. А. Анализ динамической модели фрагмента перекрытия здания	137
---	-----

ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

ГАЛЮЖИН С. Д., ГАЛЮЖИН Д. С., ЛОБИКОВА О. М. Ноосфера или техносфера?	144
--	-----

СОЛОВЬЕВ В. Н., БИДА Л. А., КУЗЬМИНА Н. Д., ФОКИНА Г. И., ЛЕВЧУК А. С., ПЛЕЩАНКОВ И. Г., ХИЛЬКО Л. И. Отработка элементов технологии газификации местных видов топлива	156
---	-----

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ВОЙТОВ И. В., ГАТИХ М. А., ПИСАРИК Г. П., РЫБАК В. А. Научно-технические принципы построения и взаимосвязи в электронной системе мониторинга Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь.....	167
--	-----

ФИКОВ А. С. Потенциал энергосбережения от очистки магистральных нефтепроводов.....	174
---	-----

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЖЕЛТОК Н. С., ПЛАКСИНА Г. Н. Преодоление проблем региональной дифференциации как условие устойчивого развития Республики Беларусь.....	182
---	-----

- 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

TRANSPORT

DOUBOVIK D. A. Optimization of turning angles of steered driving wheels of the vehicle.....	7
EMELJANOVICH I. V. Typification, unification, the cost price and competitiveness of «Belarus» tractors.....	17
KURILOV E. V., SHCERBAKOV A. S. To the question of efficiency of slanting cutting the ground with a disk knife	24
SAZONOV I. S., KIM V. A., KRASNEVSKY L. G., SKOJBEDA A. T., ZAHARIK A. M., BILYK O. V., AMELCHENKO N. P. Efficiency of use of the information on forces in algorithms of control of saddle-type articulated lorry braking	33
SAZONOV I. S., SKOJBEDA A. T., KRASNEVSKY A. G., KIM V. A., BILYK O. V., AMELCHENKO N. P. Modelling of movement of saddle-type articulated lorry taking into account the separation of operated wheels of the tractor	38

MECHANICAL ENGINEERING. METALLURGY

GARLACHOV N. S., ANTONOVA E. N. Management of the roughness and the form of the microrelief at strengthening pneumocentrifugal processing apertures.....	44
IGNATISHEV R. M. The basic results of researches for geometrical and kinematic calculations of sine-and-eccentric motions.....	53
LOVSHENKO G. F., LOVSHENKO F. G., LOVSHENKO Z. M. Optimization of the process of mechanical alloy at the reception of age-hardened nano-strustural mechanically alloyed nickel materials	61
LOGVIN V. A., ZHOLOBOV A. A. Features of modelling of supercalander stack packed paper shafts for accuracy maintenance at processing with cup tools with continuously renovated cutting edge.....	71
SUBBOTIN S. P. Realization of a complex of research and development on perfection of pumps of GDM type for oil-and-gas and chemical branches.....	81

TOKMENINOV K. A., SHIROCHENKO V. A. The way of anticorrosive protection of metals by the method cold zink plating.....	89
HABIBULLIN A. I., LOVSHENKO G. F., LOVSHENKO F. G. Calculation of limiting depth of extrusion in blanks from dispersion-reinforced copper.....	95
HABIBULLIN A. I., LOVSHENKO G. F., LOVSHENKO F. G. Technological features of pres- sure processing of blanks from dispersion-reinforced copper	104
TSUMAREV Y. A., KULIKOV V. P., LATUN T. S., RADCHENKO A. A. The estimation method of mecha- nical characteristics of solder connections at static and dynamic tests.....	112
SHEMENKOV V. M., LOVSHENKO G. F. Structural changes in the surface layers of single-carbide hard metals as they are processed in a glow discharge.....	121
YAKUBOVICH D. I. Influence of accuracy of assemb- lage on stability of burning of an arch and the geomet- rical sizes of a seam at welding of thin sheet metal.....	131

CIVIL ENGINEERING. ARCHITECTURE

ALIAWDIN P. V., MUZYCHKIN J. A. The analysis of dynamic model of the building floor slab fragment	137
---	-----

LABOUR PROTECTION. ENVIRONMENT PROTECTION. GEOECOLOGY

GALYZHIN S. D., GALYZHIN D. S., LOBIKOVA O. M. Biosphere or texnosphere?.....	144
SOLOVYEV V. N., BIDA L. A., KUZMINA N. D., FOKINA G. I., LEVCHUK A. S., PLESCHANKOV I. G., HILKO L. I. The gasification technology elements try-out of local kinds of fuel	156

ELECTRICAL ENGINEERING

VOITOV I. V., GATIH M. A., PISARIK G. P., RYBAK V. A. Scientific-technical principles of crea- ting and intercommunication in the electronic system of monitoring of state program of innovations deve- lopment of Belarus	167
--	-----

FIKOV A. S. Potential of energy efficiency from clearing of the oil-trunk pipelines.....	174
--	-----

ECONOMICS. ECONOMIC SCIENCES

ZHELTOK N. S., PLAKSINA G. N. Overcoming problems of regional differentiation as the condition of the sustainable development of Belarus.....	182
--	-----

ТРАНСПОРТ

УДК 629.114.2

Д. А. Дубовик, канд. техн. наук

ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛОВ ПОВОРОТА УПРАВЛЯЕМЫХ ВЕДУЩИХ КОЛЕС МОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Приводятся результаты исследования кинематики поворота управляемых колес внедорожной машины МЗКТ с колесной формулой 8×8 и двумя передними управляемыми мостами. Разработан метод оптимизации углов поворота управляемых ведущих колес мобильной машины с позиции критерия эффективности ходовой системы. Анализируются результаты применения разработанного метода для оптимизации углов поворота управляемых ведущих колес внедорожной машины МЗКТ-79305.

Введение

Величина и соотношение углов поворота управляемых колес при реализации управляющего действия водителя рулевым колесом определяются значением передаточного числа рулевого привода и кинематикой рулевой трапеции мобильной машины. Последняя формируется характерными особенностями принятой при проектировании кинематической схемы рулевой трапеции, конструктивными и установочными параметрами ее звеньев.

Выбор кинематической схемы, конструктивных и установочных параметров звеньев рулевой трапеции осуществляется исходя из особенностей конструкции конкретной мобильной машины, а также необходимости обеспечения выполнения условия качения управляемых колес по концентрическим окружностям без бокового скольжения [1–4] во всем рабочем диапазоне:

$$\operatorname{ctg} \alpha_{\text{тн}} - \operatorname{ctg} \alpha_{\text{тв}} = \frac{b_0}{l_0}, \quad (1)$$

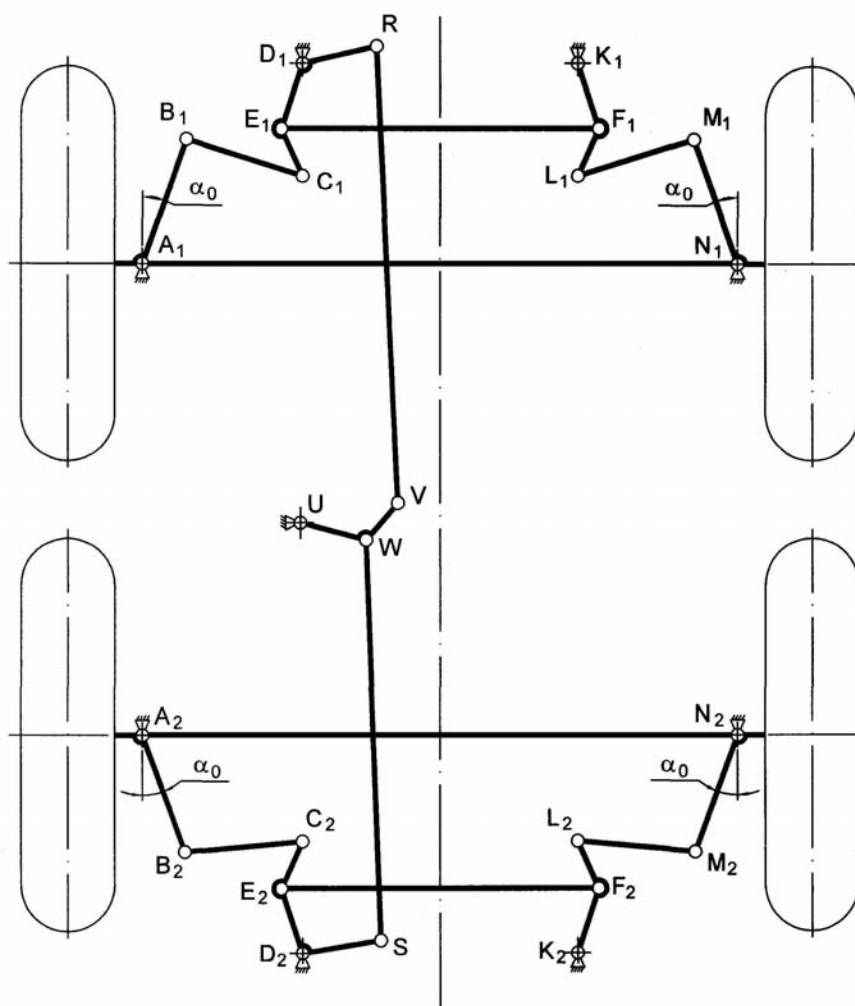
где $\alpha_{\text{тн}}$ и $\alpha_{\text{тв}}$ – теоретические углы поворота наружного и внутреннего колес управляемого моста, соответствующие их качению по концентрическим ок-

ружностям; b_0 – расстояние между точками пересечения осей поворота управляемых колес с плоскостью дороги (опорной поверхностью); l_0 – расстояние от управляемого моста до проекции центра поворота на продольную ось мобильной машины.

Используемые в настоящее время методы [5, 6] для оптимизации параметров рулевой трапеции заключаются в основном в определении оптимальных значений углов установки поворотных рычагов и длин отдельных звеньев с позиции обеспечения минимальной суммы $\sum \Delta^2$ квадратов отклонений действительных углов поворота управляемых колес от их теоретических значений, определяемых зависимостью (1). В результате такой оптимизации сумма $\sum \Delta^2$ в целом уменьшается. Однако получаемые при этом наибольшие значения отклонения (рассогласования) Δ , как правило, смещаются в область более вероятных в эксплуатации средних и малых углов поворота управляемых колес. Причем в большинстве случаев выполняемая оптимизация осуществляется без учета влияния получаемых оптимальных параметров на энергетические характеристики ходовой системы и самой мобильной машины.

В рамках настоящей работы проводились исследования кинематики и оптимизация углов поворота управле-

Методика исследований включала составление зависимостей, определяющих связи между действительными углами поворота управляемых колес, и на их основе проведение расчетных исследований кинематики поворота управляемых колес.



Рассогласование кинематики поворота управляемых колес внедорожной машины МЗКТ-79305 оценивалось ко-

эффицентом $K_{\alpha\epsilon}$, определяемым по формуле

$$K_{ac} = \left[\int_{-\alpha_{1\max}}^{\alpha_{1\max}} |\alpha_{t1H}(\alpha_{1B}) - \alpha_{1H}(\alpha_{1B})| + \right. \\ \left. + |\alpha_{t2B}(\alpha_{1B}) - \alpha_{2B}(\alpha_{1B})| + \right. \\ \left. + |\alpha_{t2H}(\alpha_{1B}) - \alpha_{2H}(\alpha_{1B})| \right] d\alpha_{1B} / \\ \left[\int_{-\alpha_{1\max}}^{\alpha_{1\max}} [\alpha_{t1H}(\alpha_{1B}) + \alpha_{t2B}(\alpha_{1B}) + \alpha_{t2H}(\alpha_{1B})] d\alpha_{1B} \right], \quad (2)$$

где $\alpha_{1\max}$ – максимальный угол поворота внутреннего колеса первого управляемого моста; α_{t1H} – теоретический угол поворота наружного колеса первого управляемого моста; α_{1B} – действительный угол поворота внутреннего колеса первого управляемого моста; α_{t2B} , α_{t2H} – теоретические углы поворота внутренних и наружных колес второго управляемого моста; α_{2B} , α_{2H} – действительные углы поворота внутреннего и наружного колес второго управляемого моста.

Расчет теоретических значений углов поворота управляемых колес выполнялся с использованием зависимостей, полученных путем соответствующих преобразований условия (1):

$$\alpha_{t1H} = \arctg \left(\frac{1}{\frac{b_{01}}{0,5 \cdot (l_3 + l_4)} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_{t1B}}} \right); \quad (3)$$

$$\alpha_{t2B} = \arctg \left(\frac{0,5 \cdot (l_3 + l_4) - l_2}{\frac{0,5 \cdot (l_3 + l_4)}{\operatorname{tg} \alpha_{t1B}}} \right)$$

и

$$\alpha_{t2H} = \arctg \left(\frac{1}{\frac{b_{02}}{0,5 \cdot (l_3 + l_4) - l_2} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_{t2B}}} \right), \quad (4)$$

где b_{01} – расстояние между точками пересечения осей поворота колес первого управляемого моста с плоскостью дороги; l_3 , l_4 – расстояния от первого управляемого моста до третьего и четвертого

мостов соответственно; b_{02} – расстояние между точками пересечения осей поворота колес второго управляемого моста с плоскостью дороги; l_2 – расстояние от первого управляемого моста до второго управляемого моста.

Исследования влияния рассогласования кинематики поворота управляемых колес на эффективность ходовой системы и оптимизация углов поворота управляемых колес с позиции эффективности ходовой системы проводились с использованием математической модели криволинейного движения колесных машин [7], составленной на основе уравнений Аппеля.

В качестве оценочного показателя эффективности ходовой системы и критерия оптимальности принимался КПД ходовой системы [8], определяемый отношением мощности $N_{k\alpha}$, расходуемой ходовой системой на осуществление движения мобильной машины в задаваемом водителем направлении к суммарной мощности N_k , переданной ходовой системе:

$$\eta_{rs\alpha} = \frac{N_{k\alpha}}{N_k} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_{k\alpha ir} + N_{k\alpha il})}{\sum_{i=1}^n (N_{kir} + N_{kil})}, \quad (5)$$

где $N_{k\alpha ir}$, $N_{k\alpha il}$ – мощности, расходуемые соответственно правым и левым ведущими колесами i -го моста на осуществление движения мобильной машины в направлении, задаваемом водителем поворотом рулевого колеса; N_{kir} , N_{kil} – мощности, подведенные соответственно к правому и левому ведущим колесам i -го моста; n – количество ведущих мостов мобильной машины.

Таким образом, задача оптимизации углов поворота управляемых колес мобильной машины формулировалась как задача условной однокритериальной оптимизации:

$$\eta_{\text{гс}\alpha} \rightarrow \max, \quad (6)$$

при следующих ограничениях, наложенных на управляемые параметры:

$$\begin{aligned} -\alpha_{1\max} &\leq \alpha_{1\text{г}} \leq \alpha_{1\max}; \\ -\alpha_{1\max} &\leq \alpha_{1\text{л}} \leq \alpha_{1\max}; \\ -\alpha_{2\max} &\leq \alpha_{2\text{г}} \leq \alpha_{2\max}; \\ -\alpha_{2\max} &\leq \alpha_{2\text{л}} \leq \alpha_{2\max}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\alpha_{2\max}$ – максимальный угол поворота ведущих колес второго управляемого моста.

Движение внедорожной машины МЗКТ-79305 моделировалось по грунтовой дороге в разбитом состоянии. Оптимизация углов поворота управляемых колес осуществлялась для каждого значения теоретического радиуса R_t поворота внедорожной машины, полученного при моделировании криволинейного движения внедорожной машины МЗКТ-79305 с действительными углами поворота управляемых колес с шагом изменения угла $\alpha_{1\text{в}}$ поворота

внутреннего колеса первого управляемого моста, равным 0,0175 рад.

Для исследования влияния кинематических параметров внедорожной машины МЗКТ-79305 на соотношения оптимальных углов поворота ее управляемых колес оптимизация выполнялась при моделировании движения с поступательными скоростями 1, 3 и 5 м/с.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований кинематики поворота управляемых колес внедорожной машины МЗКТ-79305 представлены на рис. 2 в виде графических зависимостей углов $\alpha_{1\text{н}}$ поворота наружного колеса, внутреннего $\alpha_{2\text{в}}$ и наружного $\alpha_{2\text{н}}$ колес второго управляемого моста и их теоретических значений $\alpha_{t1\text{н}}$, $\alpha_{t2\text{в}}$ и $\alpha_{t2\text{н}}$ от угла $\alpha_{1\text{в}}$ поворота внутреннего колеса первого управляемого моста из нейтрального положения в правое крайнее положение.

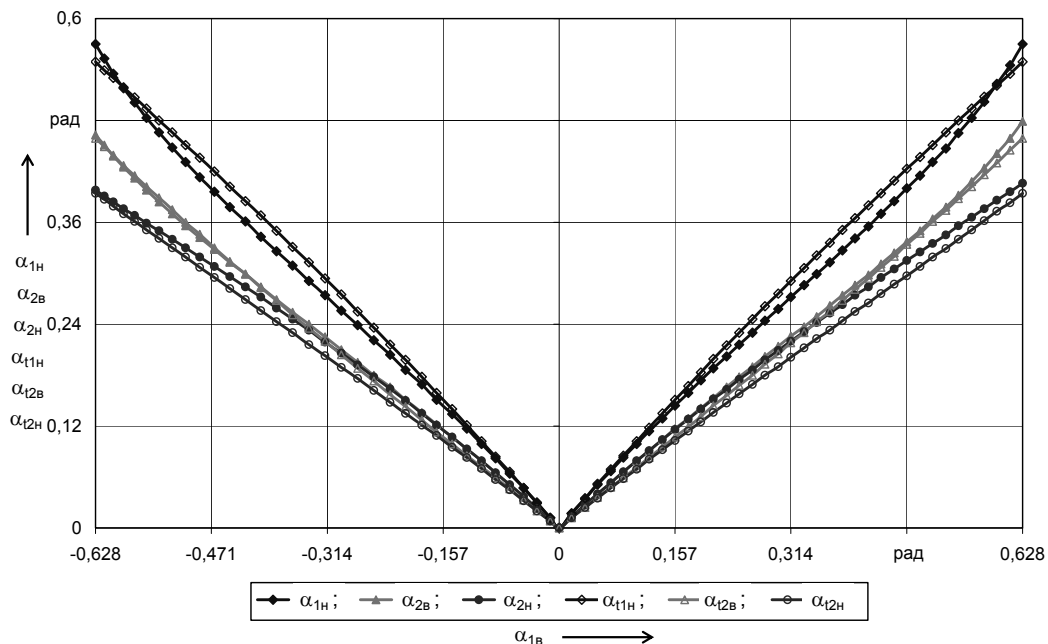


Рис. 2. Диаграмма углов поворота управляемых колес внедорожной машины МЗКТ-79305

Анализ приведенных на рис. 2 результатов моделирования показывает, что в диапазоне поворота внутреннего управляемого колеса первого моста от 0 до 0,592 рад наружное управляемое колесо первого моста поворачивается на угол меньший, чем теоретический, определяемый по зависимости (3) и обеспечивающий качение колес без бокового скольжения. При повороте управляемых колес из нейтрального положения рассогласование $\Delta_{1н}$ поворота наружного управляемого колеса первого моста увеличивается, достигая максимального значения, численно равного 0,024 рад при повороте внутреннего управляемого колеса на угол 0,419 рад. С дальнейшим поворотом управляемых колес рассогласование $\Delta_{1н}$ уменьшается и в окрестностях угла поворота внутреннего управляемого колеса 0,592 рад имеет нулевое значение. При повороте внутреннего управляемого колеса на углы, превышающие 0,592 рад, наружное управляемое колесо первого моста поворачивается на угол больший, чем теоретический (3). При повороте внутреннего управляемого колеса на максимальный угол 0,628 рад рассогласование $\Delta_{1н}$ составляет -0,021 рад.

Внутреннее управляемое колесо второго моста во всем рабочем диапазоне внутреннего управляемого колеса первого моста поворачивается на угол больший, чем теоретический (4). В диапазоне углов поворота внутреннего управляемого колеса первого моста от 0,035 до 0,593 рад рассогласование $\Delta_{2в}$ поворота внутреннего управляемого колеса второго моста находится в интервале значений -0,003...-0,01 рад. При повороте внутреннего управляемого колеса первого моста на максимальный угол рассогласование $\Delta_{2в}$ достигает максимального значения по абсолютной величине и составляет -0,02 рад.

Наружное управляемое колесо второго моста во всем рабочем диапазоне внутреннего управляемого колеса первого моста также поворачивается на угол

большой, чем теоретический (4). При повороте внутреннего управляемого колеса первого моста из нейтрального положения отклонение $\Delta_{2н}$ действительного угла поворота наружного управляемого колеса второго моста от теоретического увеличивается по абсолютной величине. При повороте внутреннего управляемого колеса первого моста на угол 0,349 рад рассогласование $\Delta_{2н}$ достигает максимального значения, равного -0,019 рад. С дальнейшим увеличением угла поворота внутреннего управляемого колеса первого моста рассогласование $\Delta_{2н}$ несколько снижается и при максимальном угле повороте управляемых колес составляет -0,011 рад.

Расчет численного значения интегрального показателя $K_{\alpha\epsilon}$ (2) показал, что рассогласование действительных углов поворота управляемых колес внедорожной машины МЗКТ-79305 составляет 4,54 %.

Исследование закономерностей распределения оптимальных углов поворота управляемых колес внедорожной машины МЗКТ-79305 проводилось путем их сопоставления с углами поворота, рассчитываемыми по зависимостям (3)–(4), а также путем анализа изменения соотношений оптимальных углов поворота управляемых колес в зависимости от угла $\alpha_{1в}$ поворота внутреннего колеса первого управляемого моста.

Соотношения оптимальных углов поворота управляемых колес, характеризующие оптимальное передаточное отношение рулевого привода колес первого и второго управляемых мостов, определялись по формулам:

$$u_1^* = \frac{\alpha_{1в}^*}{\alpha_{1н}^*}; \quad u_2^* = \frac{\alpha_{2в}^*}{\alpha_{2н}^*}, \quad (8)$$

где $\alpha_{1в}^*$, $\alpha_{1н}^*$ и $\alpha_{2в}^*$, $\alpha_{2н}^*$ – оптимальные значения углов поворота внутреннего и наружного колес соответственно первого и второго управляемых мостов.

Зависимости соотношений u_1^* и u_2^* оптимальных углов поворота управляемых колес от угла $\alpha_{1в}$ поворота внутреннего колеса первого управляемого моста приведены на рис. 3–5. Их анализ показывает, что соотношения u_1^* и u_2^* оптимальных углов поворота управляемых колес и соотношения u_{t1} и u_{t2} углов поворота, рассчитанных по формулам (3)–(4), имеют близкие, но не равные значения. Причем отклонения соотношений u_1^* и u_2^* от соотношений u_{t1} и u_{t2} зависят от кинематических параметров криволинейного движения внедорожной машины. Вследствие данной зависимости отклонения соотношений u_1^* и u_2^* от соотношений u_{t1} и u_{t2} возрастают при увеличении углов поворо-

та управляемых колес и поступательной скорости движения внедорожной машины. При этом в рассматриваемом примере отклонения достигают максимальных значений, численно равных для колес первого моста -0,0085 и для колес второго моста -0,0098, при движении внедорожной машины с поступательной скоростью 5 м/с и минимальным теоретическим радиусом R_1 поворота.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что соотношения u_1^* и u_2^* и соотношения u_{t1} и u_{t2} имеют одинаковый характер изменения, увеличиваясь от единицы при нейтральном положении управляемых колес до максимального значения при повороте управляемых колес в крайнее положение.

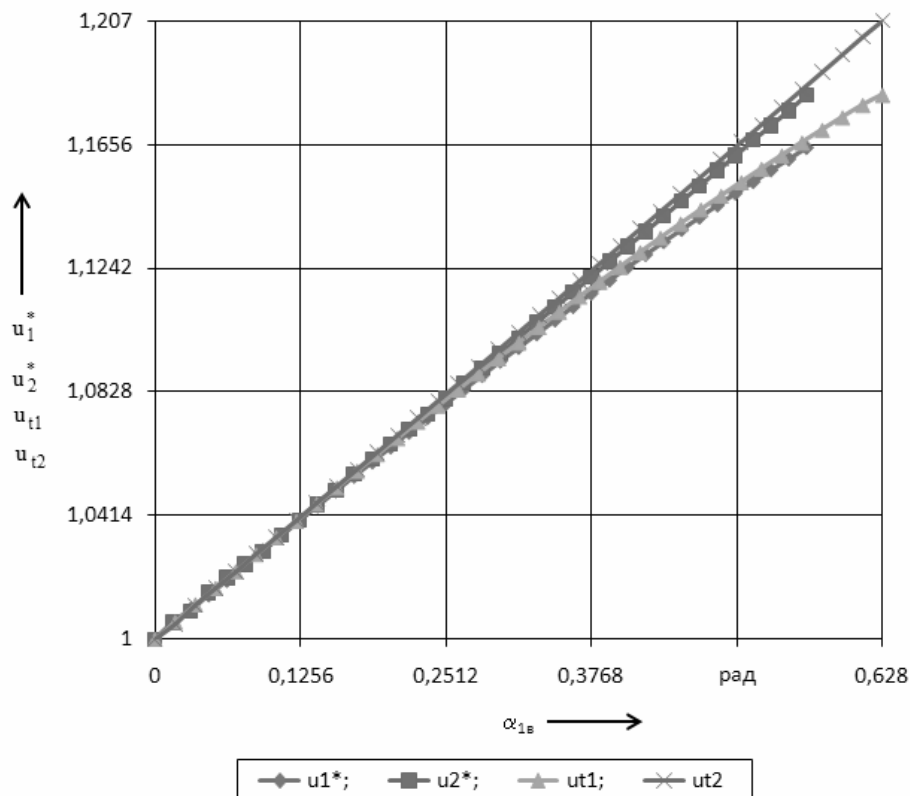


Рис. 3. Зависимости соотношений u_1^* , u_2^* и u_{t1} , u_{t2} внедорожной машины МЗКТ-79305 от угла $\alpha_{1в}$ поворота внутреннего колеса первого управляемого моста при моделировании движения со скоростью 1 м/с

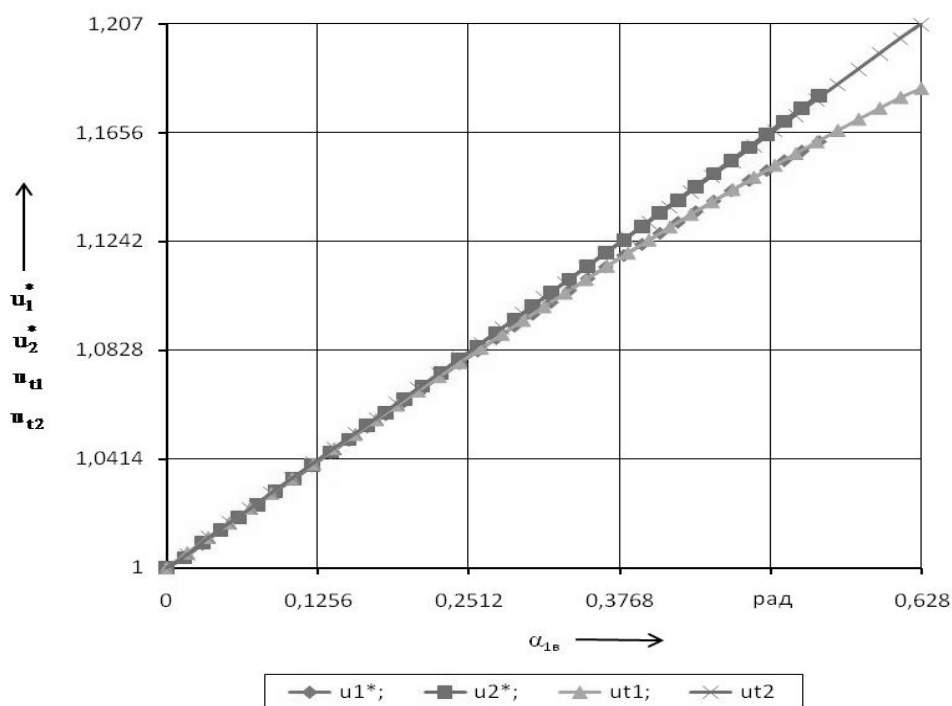


Рис. 4. Зависимости соотношений u_1^* , u_2^* и u_{t1} , u_{t2} внедорожной машины МЗКТ-79305 от угла α_{ib} поворота внутреннего колеса первого управляемого моста при моделировании движения со скоростью 3 м/с

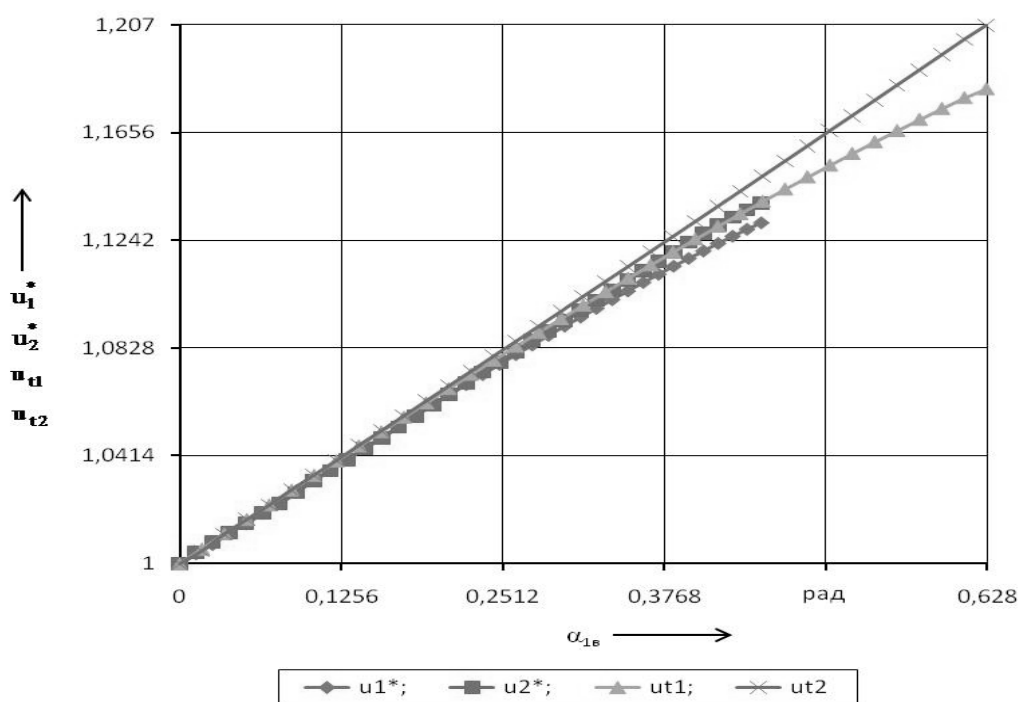


Рис. 5. Зависимости соотношений u_1^* , u_2^* и u_{t1} , u_{t2} внедорожной машины МЗКТ-79305 от угла α_{ib} поворота внутреннего колеса первого управляемого моста при моделировании движения со скоростью 5 м/с

Увеличение соотношений u_1^* и u_2^* и соотношений u_{t1} и u_{t2} происходит по закону, близкому к линейному. При этом с увеличением поступательной скорости движения внедорожной машины МЗКТ-79305 оптимальные значения углов поворота управляемых колес по сравнению с их теоретическими значениями (3)–(4) уменьшаются. Так, при увеличении поступательной скорости движения внедорожной машины МЗКТ-79305 от 1 до 5 м/с максимальные значения оптимальных углов поворота уменьшаются в среднем на 19,6 %.

Зависимости показателя (5) эффективности ходовой системы внедорожной машины МЗКТ-79305 с действительными значениями углов поворота

управляемых колес и эффективности ходовой системы внедорожной машины МЗКТ-79305* с оптимальными значениями углов поворота управляемых колес от теоретического радиуса R_t ее поворота при моделировании движения с поступательной скоростью 1 м/с приведены на рис. 6. Из рис. 6 следует, что ходовые системы внедорожных машин МЗКТ-79305 и МЗКТ-79305* имеют одинаковую эффективность при движении машин только с нейтральным положением рулевого и управляемых колес. Значение КПД ходовых систем внедорожных машин МЗКТ-79305 и МЗКТ-79305* при прямолинейном движении составляет 97,5 %.

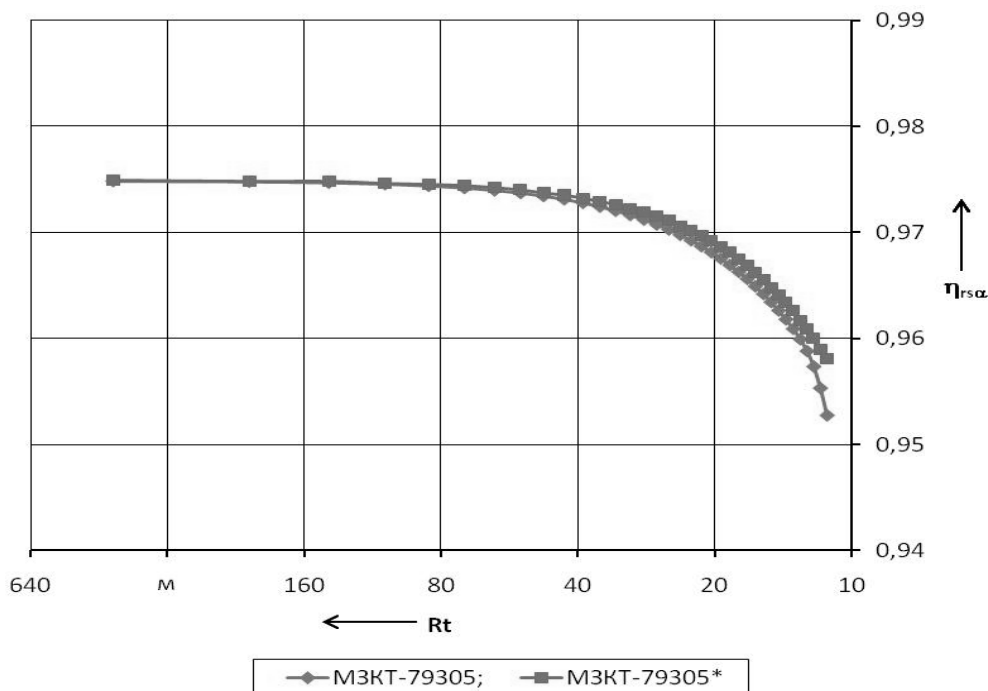


Рис. 6. Зависимости КПД ходовой системы внедорожных машин МЗКТ-79305 и МЗКТ-79305* от теоретического радиуса поворота при движении с поступательной скоростью 1 м/с

При повороте управляемых колес из нейтрального положения в крайнее положение эффективность ходовых систем внедорожных машин МЗКТ-79305 и МЗКТ-79305* снижается. При этом снижение эффективности ходовой системы

внедорожной машины МЗКТ-79305 с действительными значениями углов поворота управляемых колес происходит более интенсивно. Отклонение эффективности ходовой системы внедорожной машины МЗКТ-79305 от эффектив-

ности ходовой системы внедорожной машины МЗКТ-79305* увеличивается с увеличением углов поворота управляемых колес. При минимальном теоретическом радиусе R_t поворота эффективность ходовой системы внедорожной машины МЗКТ-79305* при повороте управляемых колес в крайнее положение снижается до 95,8 %. Отклонение эффективности ходовой системы внедорожной машины МЗКТ-79305 от эффективности ходовой системы внедорожной машины МЗКТ-79305* при этом достигает максимального значения, которое соответствует 0,54 %.

На рис. 7 приведены зависимости по-

казателя (5) эффективности ходовой системы внедорожной машины МЗКТ-79305* с оптимальными значениями углов поворота управляемых колес при движении с поступательными скоростями 1; 3 и 5 м/с от изменения теоретического радиуса R_t поворота. Из рис. 7 видно, что с увеличением поступательной скорости движения эффективность ходовой системы снижается. При прямолинейном движении увеличение поступательной скорости движения от 1 до 3 м/с приводит к снижению эффективности на 0,38 %, увеличение поступательной скорости движения от 1 до 5 м/с – на 0,77 %.

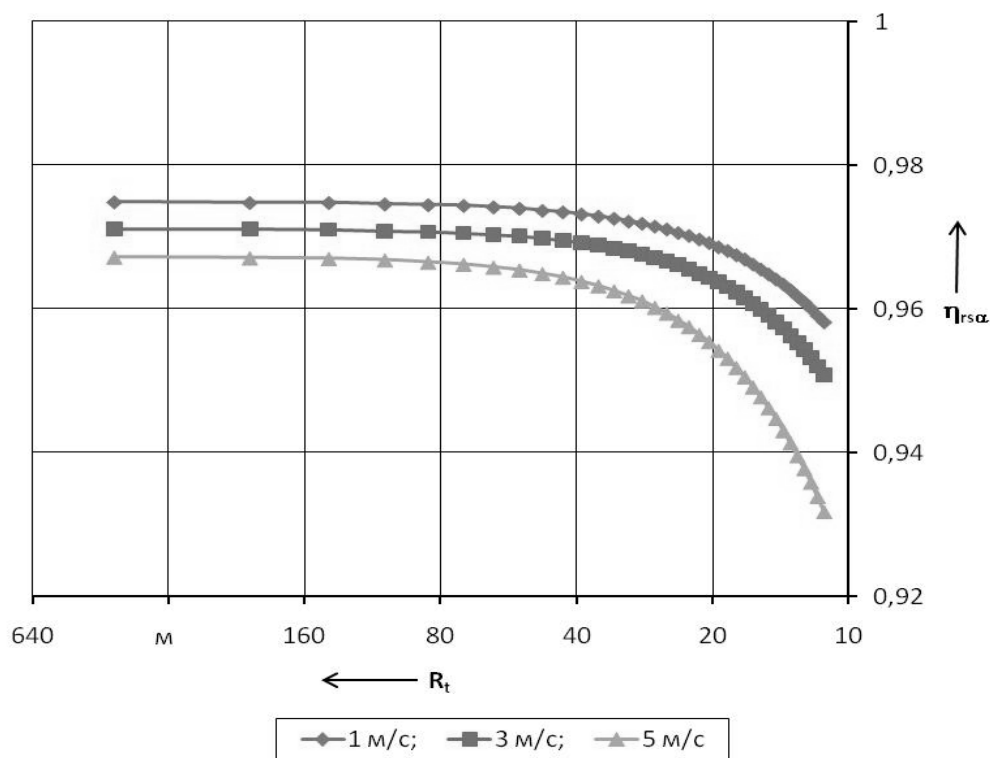


Рис. 7. Зависимости КПД ходовой системы внедорожных машин МЗКТ-79305* от теоретического радиуса поворота при движении с поступательными скоростями 1, 3 и 5 м/с

При повороте управляемых колес и увеличении кривизны траектории движения снижение эффективности ходовой системы увеличивается и достигает максимального значения при минимальном теоретическом радиусе R_t

поворота. Максимальное снижение эффективности ходовой системы при увеличении поступательной скорости движения от 1 до 3 м/с составляет 0,73 %, при увеличении поступательной скорости движения от 1 до 5 м/с – 2,64 %.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволили установить, что условие обеспечения качения управляемых ведущих колес по концентрическим окружностям не обеспечивает ходовым системам максимальную эффективность во всех условиях эксплуатации колесных машин.

Разработан метод оптимизации распределения углов поворота управляемых ведущих колес, обеспечивающий максимальную эффективность ходовых систем в общем случае криволинейного движения мобильных машин в направлении, задаваемом водителем поворотом рулевого колеса. Получены оптимальные соотношения углов поворота управляемых ведущих колес для внедорожной машины МЗКТ-79305. Установлено, что значения оптимальных соотношений углов поворота управляемых ведущих колес зависят как от величины угла поворота рулевого колеса, так и от кинематических параметров движения мобильной машины. Рассогласование действительных углов поворота управляемых ведущих колес внедорожной машины МЗКТ-79305 составляет 4,54 % и приводит к снижению эффективности ходовой системы, которое зависит от углов поворота управляемых колес и отклонения действительных углов поворота от их теоретических значений и достигает 0,54 %.

Одним из путей повышения эффективности ходовых систем колесных машин является разработка и применение в их конструкции рулевых управле-

ний с регулируемой кинематикой поворота управляемых колес, обеспечивающей изменение и реализацию оптимальных значений углов поворота управляемых колес в зависимости от величины угла поворота рулевого колеса и кинематических параметров движения колесной машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Высоцкий, М. С.** Грузовые автомобили : Проектирование и основы конструирования / М. С. Высоцкий, Л. Х. Гилелес, С. Г. Херсонский. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с.
2. **Чайковский, И. П.** Рулевые управления автомобилей / И. П. Чайковский, П. А. Соломатин. – М. : Машиностроение, 1987. – 176 с.
3. **Бухарин, Н. А.** Автомобили. Конструкция, нагрузочные режимы, рабочие процессы, прочность агрегатов автомобиля : учеб. пособие для вузов / Н. А. Бухарин, В. С. Прозоров, М. М. Щукин. – Л. : Машиностроение, 1973. – 504 с.
4. **Гришкевич, А. И.** Автомобили : Теория : учебник для вузов / А. И. Гришкевич. – Минск : Выш. шк., 1986. – 207 с.
5. **Сазонов, И. С.** Кинематика четырехзвенной рулевой трапеции и оптимизация ее параметров / И. С. Сазонов, Ю. Е. Атаманов, С. Н. Турлай // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 1. – С. 40–46.
6. **Сазонов, И. С.** Кинематика шестизвенной рулевой трапеции и оптимизация ее параметров / И. С. Сазонов, Ю. Е. Атаманов, С. Н. Турлай // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 3. – С. 40–48.
7. **Высоцкий, М. С.** Математическое моделирование криволинейного движения колесных машин / М. С. Высоцкий, Д. А. Дубовик // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 6–15.
8. **Высоцкий, М. С.** Коэффициент полезного действия ходовых систем колесных машин / М. С. Высоцкий, Д. А. Дубовик // Докл. НАН Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 2. – С. 91–94.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Материал поступил 13.11.2009

D. A. Doubovik

**Optimization of turning angles of
steered driving wheels of the vehicle**

The results of investigations of kinematics of turning of steered wheels of off-road vehicles MZKT with the wheel formula 8×8 and two front steered axles are presented in the article. The method of optimization of turning angles of steered driving wheels of mobile vehicles from a position of criterion of efficiency of running system has been developed. The results of application of the developed method for optimization of turning angles of steered driving wheels of off-road vehicles MZKT-79305 have been analyzed.

УДК 338:329.3

И. В. Емельянович

**ТИПИЗАЦИЯ, УНИФИКАЦИЯ, СЕБЕСТОИМОСТЬ И
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ТРАКТОРОВ «БЕЛАРУС»**

В статье изложены новые методы типизации, унификации, модернизации, позволяющие снизить себестоимость производства и осуществить прогноз устойчивой конкурентоспособности на рынке семейства колесных тракторов «Беларус».

Как известно, конкурентоспособность любой продукции определяется ее востребованностью на рынке и низкой себестоимостью производства. При этом требуемые потребительские свойства продукции закладываются на стадии производства и уточняются при модернизации продукции, а прибыль обеспечивается разностью между ценой на рынке и себестоимостью. Устойчивая конкурентоспособность продукции может быть обеспечена сочетанием высоких потребительских свойств и низкой себестоимости производства, коммерческими связями производителя и рынками сбыта [1].

Все потребительские свойства изделий машиностроения можно разделить на две группы: типовые (для реализации в типовых технологиях) и оригинальные (для реализации в оригинальных технологиях). Улучшение или повышение типовых потребительских свойств изделий машиностроения достигается введением в существующие конструкции заимствованных или оригинальных элементов, оцениваемых уровнем унификации. В случаях, когда на рынках появляется спрос на изделия с оригинальными или уникальными свойствами, требуются оригинальные или уникальные изделия еще не применяемых типов.

Себестоимость изделий машиностроения зависит от уровня типизации и унификации, объемов производства. Себестоимость нетиповых (оригинальных или уникальных) изделий значи-

тельно превышает себестоимость типовых унифицированных изделий. Типизация и унификация изделий влияют на конкурентоспособность и связаны с уровнем потребительских свойств и себестоимостью продукции.

На МТЗ проведены исследования влияния уровня унификации и типизации тракторов «Беларус» на себестоимость производства. За годы деятельности МТЗ освоил в опытном и серийном производстве весь типоразмерный ряд сельскохозяйственных колёсных тракторов тяговых классов 0,2...6 мощностью от 8 до 400 л. с. с различным уровнем унификации как «по горизонтали» внутри одного тягового класса, так и «по вертикали» между тракторами смежных тяговых классов.

Оценочные показатели уровня унификации типоразмерного ряда тракторов «Беларус» по «вертикали» и «горизонтали» приведены в [1]. Объёмы выпуска и себестоимость производства наиболее распространенных моделей и модификаций тракторов приведены в табл. 1.

Из теории типизации известно, что типоразмерный ряд образуют изделия одинакового или близкого назначения, но разных типов и с разными по величине основными параметрами. Типоразмерный ряд тракторов «Беларус» включает следующие типы тракторов: мини-технику (кл. 0,2), малогабаритные тракторы (кл. 0,6 и 0,9), универсально-пропашные (кл. 1,4 и 2,0), общего назначения (кл. 3,0...6). Эти тракторы создавались и осваивались, на-

чина с 50-х гг. XX в. Они подтвердили свою эффективность в сельскохозяйственном производстве как при плановой экономике СССР, так и в современной рыночной экономике. В настоящее время данный типоразмерный ряд является наиболее рациональным для МТЗ и для сельскохозяйственного производства. Однако для МТЗ как производителя тракторов в настоящее время важнейший вопрос – как обеспечить устойчи-

вую конкурентоспособность своей продукции на современных рынках, а именно:

- какие по назначению и мощности тракторы производить в каждом тяговом классе;
- какими потребительскими свойствами должны обладать тракторы;
- каковы должны быть себестоимость и программа производства.

Табл. 1. Себестоимость, рентабельность и отпускная цена на отдельные модели тракторов «Беларус» при фактической программе производства и условной программе 10 000 шт.

Модель или модификация	Программа выпуска	Себестоимость при фактической программе выпуска, тыс. р.	Рентабельность при фактической программе выпуска	Условная программа выпуска 10 000 шт.		Отпускная цена, тыс. р.
				Себестоимость, тыс. р.	Рентабельность	
80.1	1012	24613	0,3624	23347	0,4362	33532
82.1	12088	27920	0,2783	28042	0,2727	35689
92П	25	36717	0,3063	31981	0,4997	47962
826	336	32827	0,4079	30357	0,5224	46216
892	1745	29431	0,3274	28270	0,3819	39066
920	1409	28799	0,3575	27508	0,4212	39094
952	401	30474	0,3356	28296	0,4384	40701
1021	90	41475	0,411	37208	0,5729	58523
1025	1361	37608	0,3354	35918	0,3983	50225
1221.2	608	57419	0,2656	53830	0,35	72671
1523	367	82312	0,3209	76274	0,4255	108726
1523В	13	80088	0,3982	68714	0,6296	111974

Себестоимость машиностроительной продукции при прочих равных условиях зависит от программы её производства [1]. Для сложных агрегатов (машин с большим количеством наименований деталей (более 10)) и при возможном изменении программы производства более, чем в 10 раз, т. е. при

$$\frac{\Pi'_i}{\Pi_i} > 10 \quad (1)$$

себестоимость производства изменяется по выражению

$$C'_i = C_i \cdot \left(\frac{\Pi'_i}{\Pi_i} \right)^b, \quad (2)$$

где C'_i , C_i – себестоимости изготовления типоразмера i при программах производства Π'_i и Π_i соответственно; b – коэффициент, определяемый по фактическим данным себестоимости и программам выпуска.

Для сельскохозяйственных колёсных тракторов (Т–28, Т–28Х и Т–28Х2) ранее рекомендовалось $b = -0,0218$ [4].

Если известны значения C_i , C'_i , Π_i и Π'_i по нескольким близким тракторам, то

$$b = \frac{\ln C'_i - \ln C_i}{\ln \left(\frac{\Pi'_i}{\Pi_i} \right)}. \quad (3)$$

По данным исследований объёмов и себестоимости производства тракторов 892 и 952 и близким им модификациям определён показатель степени b :

– для 892

$$b = \frac{\ln 31892 - \ln 29431}{\ln \frac{38}{1745}} = -0,0209;$$

– для 952

$$b = \frac{\ln 33224 - \ln 30474}{\ln \frac{13}{401}} = -0,0252.$$

Для унифицированных колёсных тракторов можно рекомендовать среднее из вычисленных значений $b = -0,0252$. Это значение не совпадает со значением b для трактора Т-28 только на 5 %.

Для сравнительной оценки себестоимости C'_i конкретной модели трактора при различных программах производства Π'_i нами предлагается выражение

$$C'_i = 100 \cdot (\Pi'_i)^b, \quad (4)$$

где 100 – стоимость единичного экземпляра, %; $\Pi_i = 1$.

Так при годовой программе 100; 500; 1000 и 10000 шт. тракторов в год себестоимость составит соответственно 89,93; 86,65; 85,28 и 84,93 %. Зависимость себестоимости трактора от годовой программы производства приведена на рис. 1.

Следует отметить, что в выражении (3) не учитывается год производства продукции. Известно [2], что себестоимость продукции при непрерывном многолетнем производстве снижается по мере отработки и совершенствования технологии. Однако для выявления этой закономерности необходимо изучить производственные затраты в промежутке времени от постановки продукции на производство до прекращения её производства.

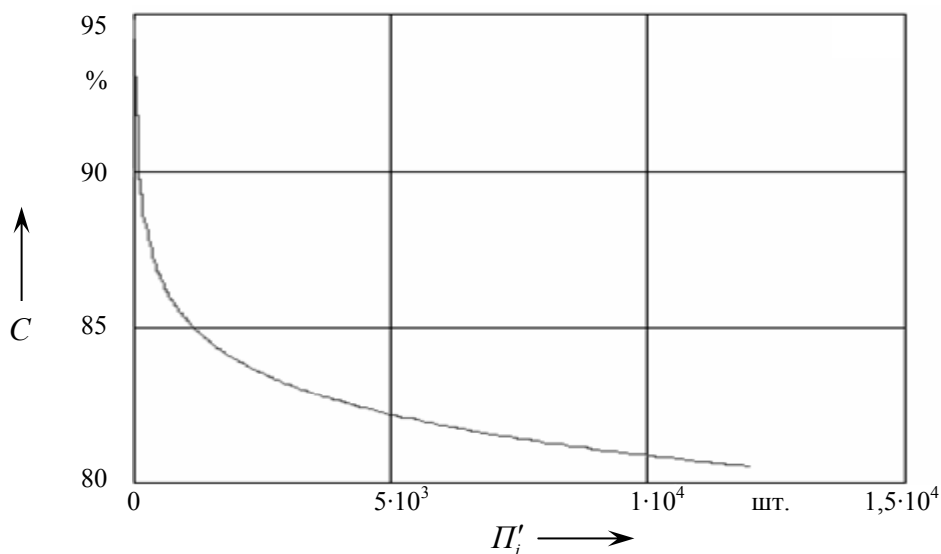


Рис. 1. Зависимость себестоимости трактора от годовой программы производства

Приведенные зависимости позволяют прогнозировать по каждой модели или модификации экономически выгодные объёмы производства, а также планировать отпускные цены по заданным программам производства. В табл. 1 по некоторым моделям и модификациям приведены в качестве примера значения себестоимости и рентабельности при фактической программе производства и условной программе производства 10000 шт. в год. Из табл. 1 и рис. 2 видно, что при программе производства ниже 500 шт. в год резко возрастает себестоимость, а при программе свыше 10000 шт. себестоимость снижается незначительно. Из этого следует, что две или три модификации с близкими потребительскими свойствами и с небольшими программами производства производителю выгодно заменить одной, но с большей программой производства.

Потребительские свойства оцениваются комплексом показателей, отра-

жающих функциональные, энергетические свойства, а также свойства управляемости, надёжности, экологичности, безопасности и т. д. Многообразие потребительских свойств не позволяет однозначно выявить их функциональную связь с уровнями унификации и себестоимости. Однако по всему типоразмерному ряду тракторов «Беларус» прослеживаются зависимости, близкие к функциональным.

Так, повышение уровня потребительских свойств или их номенклатуры всегда сопровождается введением новых элементов в конструкцию трактора и одновременным снижением уровня унификации и повышением себестоимости. На рис. 2 приведен график зависимости себестоимости тракторов от одного из основных потребительских свойств – мощности, а в табл. 2 и на рис. 3 – зависимость уровней унификации от относительного увеличения мощности при модернизации тракторов.

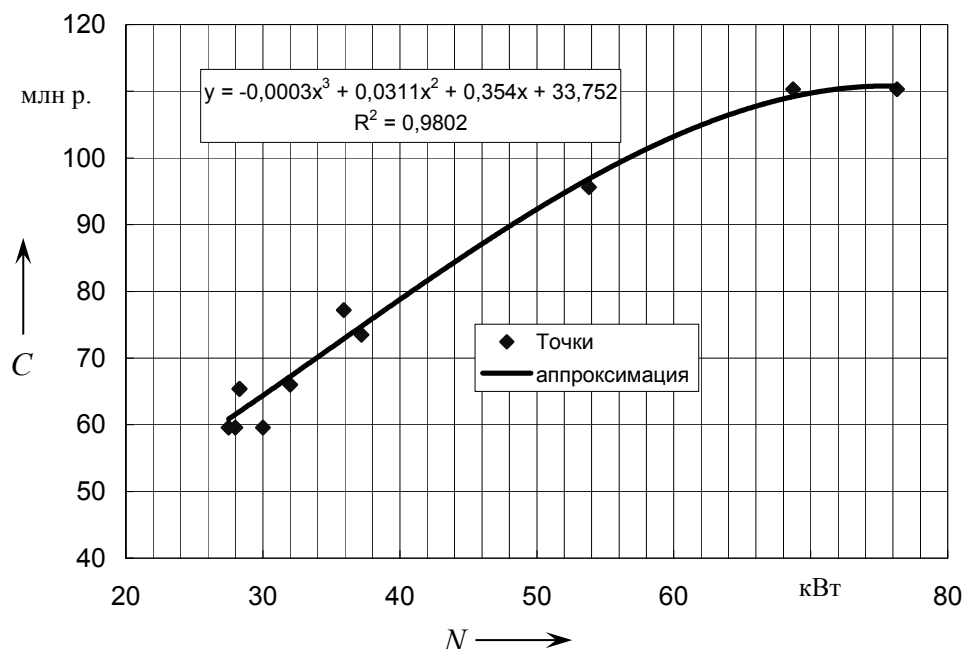


Рис. 2. Зависимость себестоимости изготовления тракторов от их мощности

Табл. 2. Уровень унификации новых моделей с базовыми при увеличении их мощности

Базовая модель всех модификаций	Уровень унификации с базовой моделью K_y	Относительное увеличение мощности модифицированной модели K_N	Коэффициент b
82.1-1025	59	1,295	1,788
1025-1221	80	1,238	0,9376
1221-1221	52	1,295	2,217
1222-1523	98	1,1	0,202
1523-2022	66	1,4	1,039
2022-2522ДВ	48	1,263	2,791

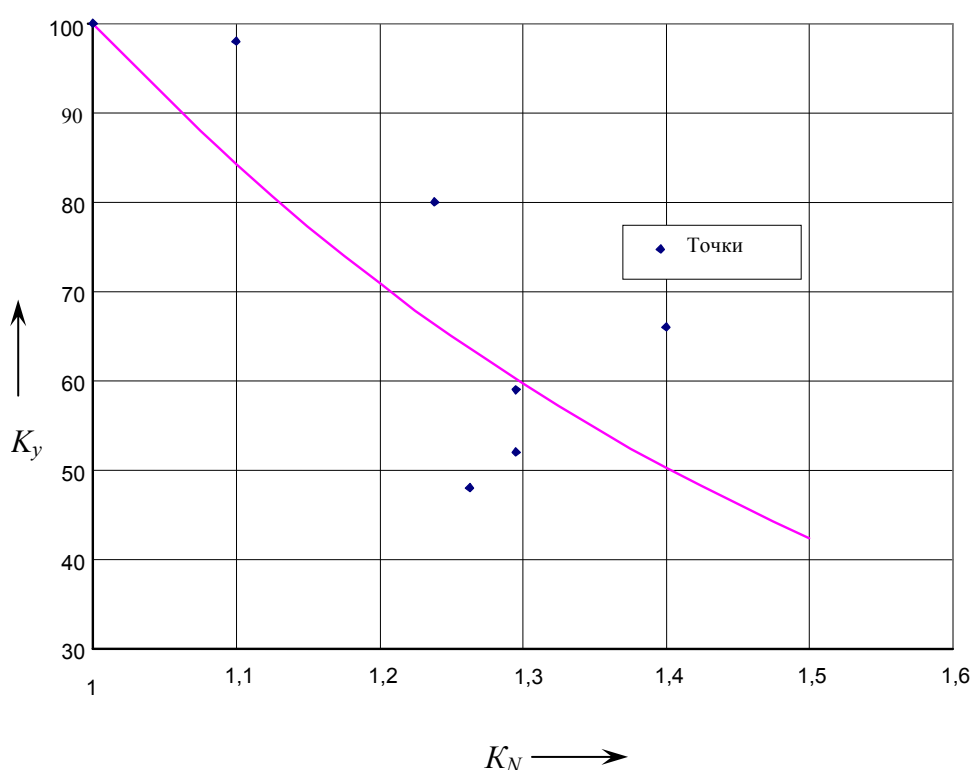


Рис. 3. Зависимость уровня унификации от относительного увеличения мощности

Как видно из графиков и таблицы, зависимость себестоимости от мощности параболическая, зависимость уровня унификации от мощности обратно экспоненциальная, близкая к зависимости уровня унификации от экономического эффекта [2]; она может быть описана выражением

$$K_y = 100 \cdot e^{c(K_N - 1)}, \quad (5)$$

где K_N – коэффициент повышения мощности трактора модернизируемой модели, $K_N = \frac{N_M}{N_\delta}$; c – коэффициент, определяемый опытным путём, $c = \frac{\ln 100 - \ln K_y}{K_N - 1}$.

Разброс данных на рис. 3 показывает, что себестоимость и уровень уни-

кации взаимосвязаны корреляционной зависимостью.

На себестоимость трактора влияет не только мощность, но и другие потребительские свойства, однако влияние каждого из них не равнозначно. Наибольшее влияние на себестоимость и ценообразование оказывают эксплуатационная мощность (коэффициент корреляции $\rho = 0,65$), эксплуатационная масса ($\rho = 0,66$), ёмкость топливного бака ($\rho = 0,67$), допустимая масса трактора ($\rho = 0,52$), навесоспособность трактора ($\rho = 0,39$) и т. д. [4]. Для объективной количественной оценки потребительских свойств целесообразно иметь интегральный показатель.

По полученным данным можно принимать решения о целесообразности производства отдельных моделей или о их эффективном продвижении на существующих или новых рынках сбыта.

Типизация и унификация машин выступают в диалектическом единстве, их рациональное сочетание обеспечивает повышение потребительских свойств и прибыльность производства машин.

Влияние унификации тракторов на экономику производства изучалось на МТЗ, учитывался отраслевой опыт 70-х гг. [2]. Уровень унификации и эффективность новой модернизируемой модели функционально взаимосвязаны:

$$K_y = 100 \cdot e^{-a\mathcal{E}_{om}}, \quad (6)$$

где $\mathcal{E}_{om}$ – относительный годовой экономический эффект, за который можно принять рентабельность вновь создаваемой модели по отношению к базовой, $\mathcal{E}_{om} = P_{HM}$.

Поскольку рентабельность прямо пропорционально зависит от себестоимости, то для предварительной оценки уровня унификации за относительную годовую эффективность можно принять

$$\mathcal{E}_{om} = \frac{C_M - C_{\bar{o}}}{C_{\bar{o}}} = \frac{C_M}{C_{\bar{o}}} - 1 = K_c - 1, \quad (7)$$

где $C_{\bar{o}}$, C_M – себестоимости базовой и модернизируемой моделей; K_c – коэффициент относительного увеличения себестоимости, $K_c = \frac{C_M}{C_{\bar{o}}}$.

При этом выражение (7) примет вид:

$$K_y = 100 \cdot e^{-a(K_c - 1)}. \quad (8)$$

Выражение (8) можно преобразовать в выражение для оценки зависимости уровня себестоимости изготовления модернизируемых машин от их уровня унификации с базовой моделью:

$$K_c = \frac{\ln 100 - \ln K_y}{a} + 1, \quad (9)$$

где $a = 1,32$.

Выражение (9) и график на рис. 2 позволяют еще на стадии проектирования новой модели оценить возможное повышение её себестоимости по сравнению с базовой моделью.

Выполненный анализ состояния унификации и типизации выпускаемой продукции на МТЗ показывает, что для поиска путей повышения конкурентоспособности продукции необходим постоянный мониторинг состояния потребительских свойств продукции, связанных с типизацией и унификацией [1–3]. При этом типизация и унификация могут стать надежным средством обеспечения эффективности и конкурентоспособности выпускаемой и планируемой продукции. Однако следует иметь в виду, что и типизация, и унификация продукции имеют свои временные ограничения.

Так, существующий рациональный типоразмерный ряд тракторов «Беларус» будет эффективным до тех пор, пока в сельскохозяйственном производстве будут доминировать сложившиеся типовые агротехнологии.

Если же в агропроизводстве возникнет потребность в новых оригинальных или уникальных технологиях, то потребуются изменения в типоразмерном ряду, при которых одни устаревшие типы тракторов должны выводиться из типажа и производства, а другие, оригинальные или уникальные, – вводиться в типаж и осваиваться в производстве.

В настоящее время в мировом агропроизводстве востребованы энергосберегающие и экологически безопасные технологии. Для таких технологий МТЗ предлагает тракторы с гибридными моторно-трансмиссионными установками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усс, И. Н. Применение методов унификации и типизации при создании семейства колёсных тракторов «Беларус» / И. Н. Усс // Тракторы и сельхозмашины. – 2008. – № 5. – С. 28–31.
2. Трофимов, В. А. Техничко-экономическая оценка уровня унификации машин / В. А. Трофимов, С. В. Барамзин // Стандарты и качество. – 1977. – № 3. – С. 57–59.
3. Кубарев, А. И. Унификация в машиностроении / А. И. Кубарев. – М. : Изд-во стандартов, 1969. – 160 с.
4. Создать модели и прикладные программы по прогнозированию цен для различных рынков сбыта тракторов и оценки их конкурентоспособности и эффективности : отчет о НИР / БНТУ. – Минск, 2002. – 71 с.

РУП Минский тракторный завод
Материал поступил 10.02.2010

I. V. Emeljanovich
Typification, unification, the cost price
and competitiveness of «Belarus» tractors

In the article new methods of typification, unification and modernization allowing to cut production costs of manufacture of family of wheel tractors «Belarus» and to carry out the forecast of their steady competitiveness on the market.

УДК 621.878:629.114.2

Е. В. Курилов, канд. техн. наук, доц., А. С. Щербаков

К ВОПРОСУ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОСОГО РЕЗАНИЯ ГРУНТА ДИСКОВЫМ НОЖОМ

В статье предложены математическая модель процесса косого резания грунта дисковым ножом, критерии оценки его эффективности и метод расчёта сопротивлений резанию с учётом режима качения дискового ножа, что имеет существенное значение при проектировании таких рабочих органов.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности землеройных машин является применение рабочих органов, реализующих принцип косого резания грунта. Такие отвально-ковшовые рабочие органы были созданы на кафедре СДМ ЯГТУ. Отличительной особенностью этих конструкций является наличие двух симметрично установленных, свободно вращающихся дисковых ножей, производящих косое резание грунта [1, 2].

Вопросы теории косого резания грунта дисковым ножом наиболее детально разработаны применительно к рабочим органам сельскохозяйственного и лесотехнического назначения [3, 4] и в меньшей степени в области землеройных машин [5–7]. Например, М. И. Эстрин [8] исследовал процесс косого резания грунта жестко закреплённым дисковым ножом грейдера элеватора, а Е. Д. Галочкин [9] пришел к выводу о нецелесообразности использования дискового ножа в конструкциях рабочих органов землеройных машин.

Поэтому целью данного исследования является разработка научно обоснованных критериев оценки эффективности косого резания грунта дисковым ножом и метода расчёта сопротивлений резанию, что имеет существенное значение для проектирования таких рабочих органов.

Работу по отделению грунта от массива в момент его деформации и сдвига у косо установленного дискового ножа выполняют его режущая кромка и вогнутая сферическая боковая поверх-

ность, совершающие в пространстве сложное (винтопланетарное) движение. Кроме того, поворот ножа в плане к направлению движения приводит к изменению параметров, влияющих на процесс резания: угла резания, площади срезаемой стружки, направления движения грунтовой массы и т. д.

Для упрощения математического описания процесса принимаются следующие допущения:

- дисковый нож имеет режущую кромку без затупления;
- все распределенные элементарные силы, действующие на боковую поверхность ножа со стороны грунта, приводятся к двум равнодействующим: силе нормального давления N_p и трения F_p , которые имеют общую точку приложения, расположенную в вертикально-диаметральном сечении ножа на расстоянии, равном половине глубины его погружения в грунт;
- вектор силы трения F_p направлен в противоположную сторону вектора проекции абсолютной скорости движения точки её приложения на боковую поверхность ножа.

Действие сил N_p и F_p уравновешивается тремя внешними силами P_{01} , P_{02} , P_{03} , приложенными к оси вращения дискового ножа (рис. 1).

Задача по определению составляющих сопротивлений резанию косым клином [10] сводится к отысканию направления действия силы трения F_p в системе координат XYZ , т. к. сила N_p действует в вертикально-диаметральном сечении дискового ножа, в направлении

от центра кривизны сферической боковой поверхности к точке её приложения

под углом γ к горизонту (рис. 2).

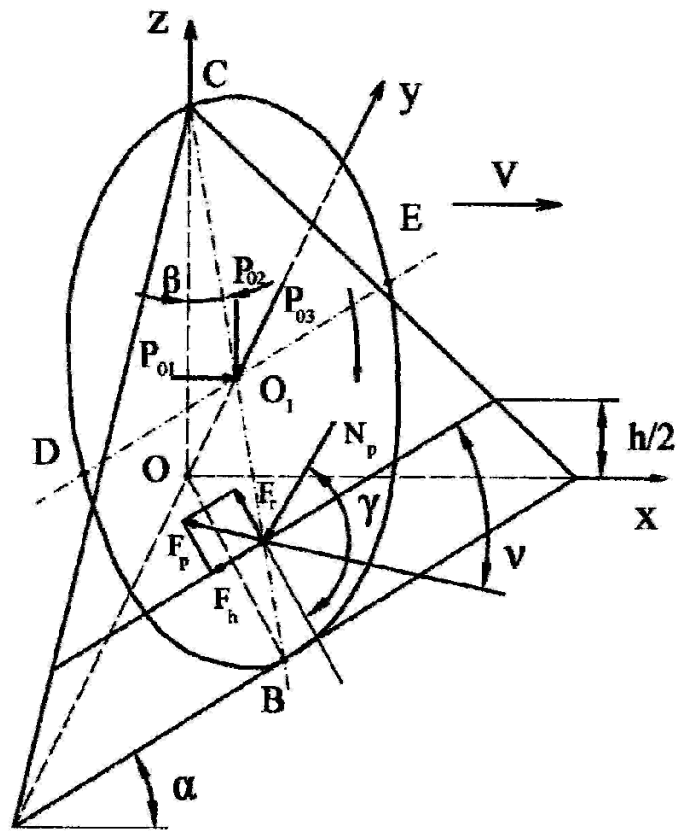


Рис. 1. Схема сил, действующих на дисковый нож

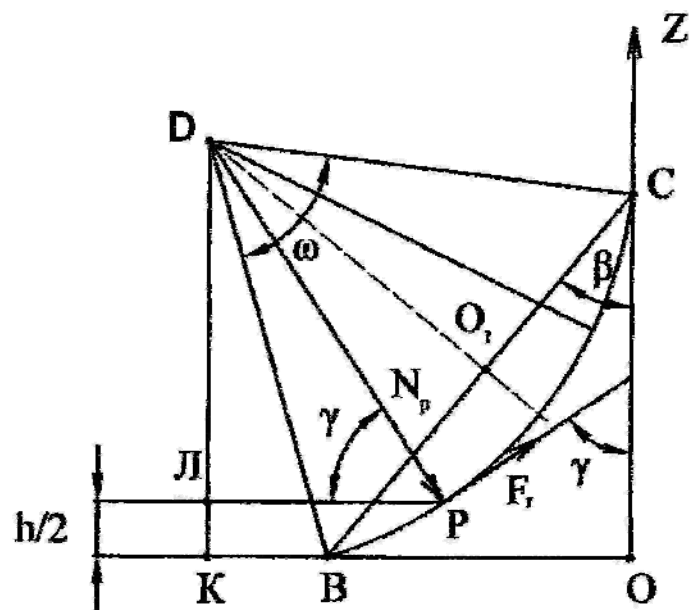


Рис. 2. Схема определения угла γ

Величина угла γ определяется из решения треугольников ВКД и РЛД:

$$\gamma = \arcsin[\sin(\omega/2 + \beta) - h/(2R)], \quad (1)$$

где ω – центральный угол сферической поверхности дискового ножа; β – угол наклона дискового ножа от вертикальной оси; h – толщина срезаемой стружки грунта; R – радиус кривизны сферической поверхности дискового ножа.

С учётом подстановок $R = d$ и $A = (h/d \cos \beta)$:

$$\gamma = \arcsin [\sin(30 + \beta) - 0,5A \cos \beta], \quad (2)$$

где d – диаметр дискового ножа.

Разложим силу F_p на горизонтальную F_h и радиальную F_r составляющие. От баланса этих сил зависит траектория перемещения грунта по боковой поверхности дискового ножа. Следовательно, для определения направления действия силы F_p необходимо определить направление вектора проекции абсолютной скорости движения её точки приложения. Кинематический анализ (рис. 3) скорости движения V_p точки приложения сил N_p и F_p не совпадает с направлением вектора поступательной скорости движения V его центра вращения и отклоняется от него на угол $\Delta\alpha$, так как составляющая скорости V_h всегда будет меньше составляющей V_1 .

С учётом того, что $\operatorname{tg} v = V_2 \sin \gamma / V_h$; $V_2 = V \sin \alpha$; $V_h = V \cos \alpha [1 - \lambda(1 - A)]$,

$$v = \arctg [\operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \gamma / 1 - \lambda(1 - A)], \quad (3)$$

где α – угол захвата дискового ножа к направлению движения; λ – кинематический параметр, характеризующий режим движения дискового ножа, $\lambda = r/r_\phi$; r – радиус дискового ножа; r_ϕ – фиктивный радиус дискового ножа.

Значение $\lambda = 1$ соответствует качению дискового ножа без скольжения или буксования; $0 < \lambda < 1$ – качению со скольжением; $\lambda > 1$ – качению с буксованием; $\lambda = 0$ – поступательному движению без качения.

Спроектировав действующие силы

на координатные плоскости, получим

$$\begin{cases} P_{01} = N_p \sin \alpha [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \times \\ \times (\sin v \cdot \sin \gamma + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos v)]; \\ P_{02} = N_p (\operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \sin v \cdot \cos \gamma - \sin \gamma); \\ P_{03} = N_p \cos \alpha [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \times \\ \times (\sin v \cdot \sin \gamma - \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos v)], \end{cases} \quad (4)$$

где P_{01} , P_{02} , P_{03} , – горизонтальная, вертикальная и боковая составляющие сопротивления резанию соответственно; φ_1 – угол внешнего трения грунта о сталь.

Тогда при известном сопротивлении P_{01} определим P_{02} и P_{03} :

$$\begin{cases} P_{02} = P_{01} \cdot m; \\ P_{03} = P_{01} \cdot n, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} m = \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \sin v \cdot \cos \gamma - \sin \gamma}{\sin \alpha [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 (\sin v \cdot \sin \gamma + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos v)]}; \\ n = \frac{\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 (\sin v \cdot \sin \gamma - \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos v)}{\operatorname{tg} \alpha [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 (\sin v \cdot \sin \gamma + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos v)]}. \end{cases} \quad (6)$$

Известно [5], что величина силы N_p зависит только от физико-механических свойств и состояния разрабатываемого грунта. Отсюда горизонтальную составляющую сопротивления резанию определим в виде следующих уравнений:

$$P_{01} = k_{kp} \cdot k_{\varphi 1} \cdot F_d; \quad (7)$$

$$P_{01} = k_p \cdot k_{\varphi 2} \cdot F_d; \quad (8)$$

$$k_{\varphi 2} = k_{\varphi 1} \cdot k_{\varphi 3}, \quad (9)$$

где k_{kp} – удельное сопротивление резанию грунта косым клином; k_p – удельное сопротивление лобовому резанию грунта; F_d – площадь поперечного сечения срезаемой стружки грунта; $k_{\varphi 1}$ – коэффициент энергоёмкости, учитывающий режим движения дискового ножа; $k_{\varphi 2}$ – коэффициент энергоёмкости, учитывающий переход от косого резания грунта свободно вращающимся дисковым ножом к лобовому резанию; $k_{\varphi 3}$ –

коэффициент энергоёмкости, учитывающий переход от резания грунта ко-

сым клином (жестко закрепленным дисковым ножом) к лобовому.

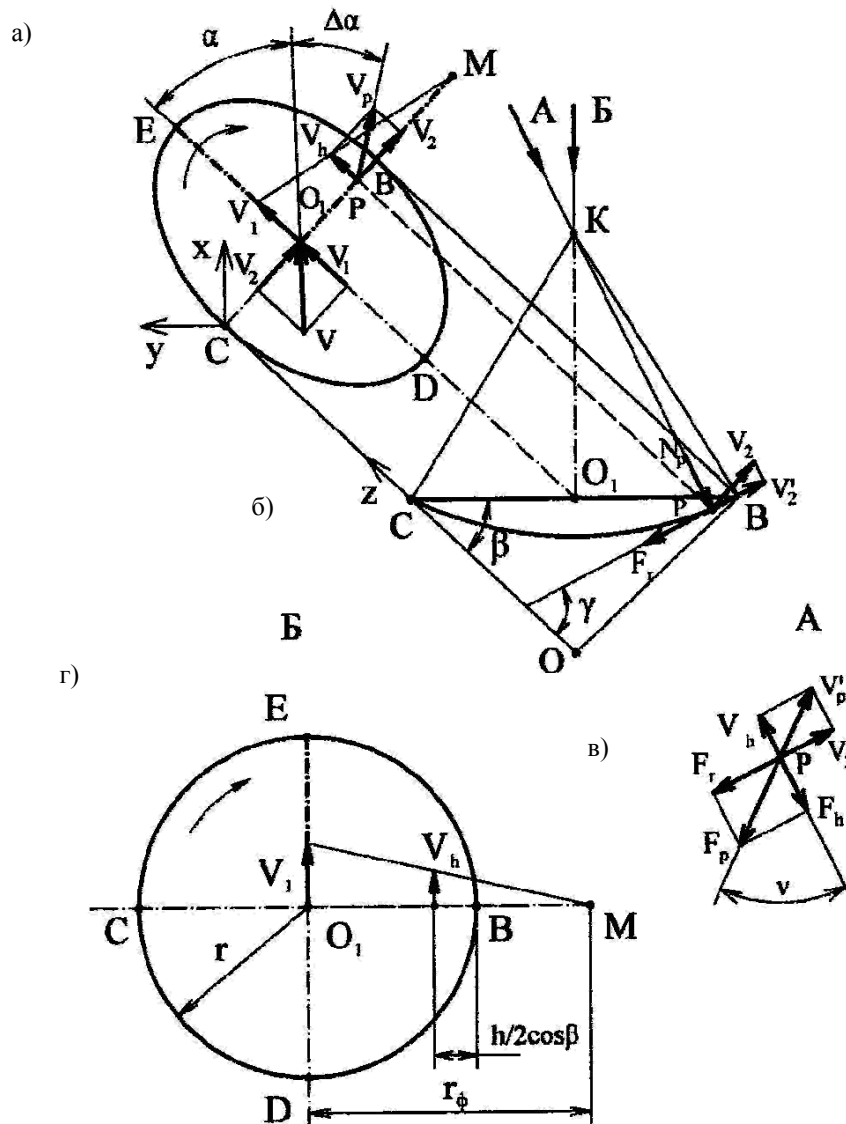


Рис. 3. Схема для определения угла v

Значения k_{31} , k_{32} и k_{33} определяются с учётом поправки на направление действия силы трения F_p свободно вращающегося дискового ножа в сравнении с резанием косым и простым клином при помощи формул (3) и (4) при $\lambda = 0$ и $\alpha = 90^\circ$:

$$k_{31} = [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot (\sin v \cdot \sin \gamma + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos v)] / [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \times (\sin v' \cdot \sin \gamma + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos v')]; \quad (10)$$

$$k_{32} = [\sin \alpha [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \times (\sin v \cdot \sin \gamma + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos v)]] / (\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \sin \gamma); \quad (11)$$

$$k_{33} = [\sin \alpha [\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \times (\sin v' \cdot \sin \gamma + \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos v')]] / (\cos \gamma + \operatorname{tg} \varphi_1 \sin \gamma); \quad (12)$$

$$v' = \arctg(\operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \beta).$$

Анализ (12) показывает, что энергоёмкость косого резания грунта жестко

закреплённым дисковым ножом при равных прочих условиях зависит от угла захвата α , что хорошо согласуется с экспериментальными данными по косому резанию грунтов, полученными в

ЦНИИС И. А. Недорезовым [5]. Для сравнения произведём расчёт $k_{\alpha 3}$ при $\alpha = 30 \dots 90^\circ$, $\gamma = 50^\circ$, $\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,6$ (результаты которого представлены в табл. 1).

Табл. 1. Результаты расчета $k_{\alpha 3}$

α , град	90	75	60	45	30
По данным ЦНИИС	1	1	1	0,83	0,79
Расчетное по формуле (12)	1	0,99	0,96	0,83	0,81

Для выявления значимых факторов, влияющих на процесс косого резания грунта дисковым ножом, был произведён расчёт коэффициентов энергоёмкости по формулам (10)–(12) на ЭВМ при условии, что: $R = d$; $A = 0,05 \dots 0,25$; $\lambda = 0,7 \dots 1,1$; $\alpha = 25 \dots 45^\circ$; $\beta = 0 \dots 40^\circ$ и $\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,6$.

В результате аппроксимации расчётных значений коэффициентов $k_{\alpha 1}$, $k_{\alpha 2}$, $k_{\alpha 3}$ были получены уравнения регрессии с достаточно высокой для инженерных расчётов корреляционной связью между параметрами в исследуемом диапазоне (квадраты коэффициентов корреляции соответственно равны 0,81; 0,92; 0,92):

$$k_{\alpha 1} = 1,23 + 0,001(2\alpha - \beta) - 0,2(2,5\lambda - A); \quad (14)$$

$$k_{\alpha 2} = 0,77 + 0,002(4\alpha - \beta) - 0,4(\lambda - 1,5A); \quad (15)$$

$$k_{\alpha 3} = 0,68 + 0,001(7\alpha - \beta). \quad (16)$$

Из этих уравнений следует, что эффективность процесса косого резания грунта зависит от углов установки (α , β) дискового ножа, режима его качения (λ) и параметров срезаемой стружки (A). При этом доминирующими факторами являются угол захвата и режим качения дискового ножа. Это подтверждается графиками, представленными на рис. 4.

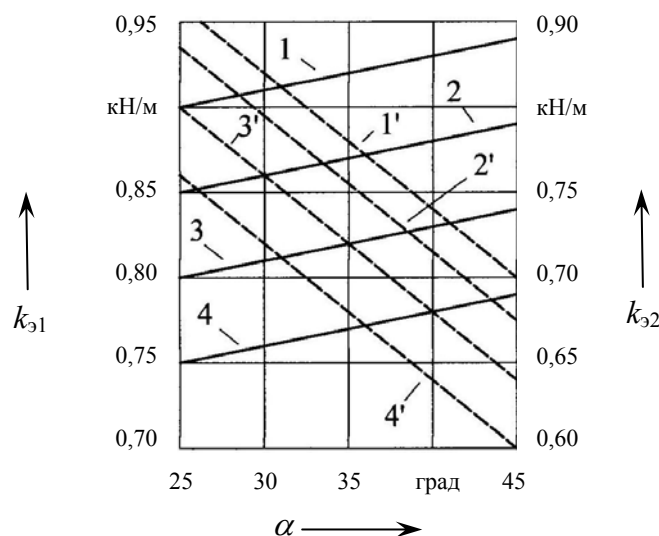


Рис. 4. Зависимости: — $k_{\alpha 1} = f(\alpha)$ при $\beta = 10^\circ$; 1 — $\lambda = 0,8$; 2 — $\lambda = 0,9$; 3 — $\lambda = 1$; 4 — $\lambda = 1,1$; — — $k_{\alpha 2} = f(\alpha)$ при $\beta = 10^\circ$; 1 — $\lambda = 0,8$; 2 — $\lambda = 0,9$; 3 — $\lambda = 1$; 4 — $\lambda = 1,1$

Из анализа графиков очевидно, что с увеличением α наблюдается рост значений $k_{\alpha 1}$ и $k_{\alpha 2}$, т. е. возрастает энергоёмкость процесса косого резания грунта. Кроме того, качение дискового ножа со скольжением ($\lambda < 1$) также приводит к значительному росту энергоёмкости этого процесса (рис. 4, зависимости 1 и 2). Вместе с тем наблюдается снижение энергоёмкости (рис. 4, зависимости 3 и 4) при качении дискового ножа с буксованием ($\lambda > 1$) и без скольжения ($\lambda = 1$). Это снижение, по сравнению с лобовым резанием $k_{\alpha 2}$, может достигать 30...40 %, а по сравнению с резанием косым клином – 15...25 %.

Следовательно, процесс косого резания грунта свободно вращающимся дисковым ножом отличается от процессов косого и лобового резания клином направлением действия силы трения на боковую поверхность ножа. При этом величина сопротивления зависит от физико-механических свойств разрабатываемого грунта, параметров срезаемой стружки, углов установки дискового

ножа, его геометрических характеристик и режима качения.

С целью проверки предложенной математической модели косого резания грунта дисковым ножом были проведены экспериментальные исследования этого процесса на грунтовом канале в лаборатории землеройных машин ЯГТУ.

Исследования проводились на полномасштабной модели (рис. 5), которая состоит из державки 1, соединительных звеньев 2, 3, 4 с делительными секторами 5, 6 и двух симметрично установленных сферических дисковых ножей 7, 8. Также конструкция модели позволяет уравновесить боковые составляющие сопротивления резанию.

Техническая характеристика модели:

Дисковый нож:
 диаметр, м.....0,4
 радиус кривизны, м.....0,4
 Углы установки дискового ножа:
 угол захвата, град.....15...55
 угол наклона, град.....15...55.

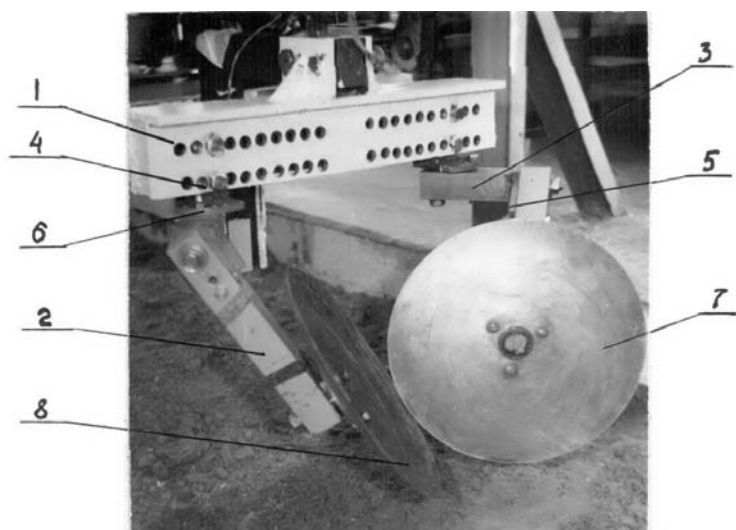


Рис. 5. Общий вид модели

Первоначально было проведено три серии опытов с целью выявления зависимости удельного сопротивления резанию от углов установки дискового ножа. При этом изменялись углы захва-

та α в пределах от 15 до 55°, наклона β – от 25 до 45° и глубина резания h – от 0,02 до 0,1 м.

Опыты проводились на супеси объемной массой 2000 кг/м³, влажно-

стью 10...12 %, с числом ударов плотного ДорНИИ 5...6 при скорости резания 0,1 м/с. Повторность проведения каждого опыта составляла 3...4, а длина пути резания – 5 м. Обработка осциллограмм проводилась методом группирования по времени, а определение доверительных интервалов выполнялось со степенью надежности 0,95.

Площадь поперечного сечения срезаемой стружки грунта дисковым ножом определялась по формуле

$$F_d = 1,1d^2 \cdot A^{1,43} \sin \alpha \cdot \cos \beta, \quad (17)$$

кинематический параметр из выражения

$$\lambda = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{L \cdot \cos \alpha}, \quad (18)$$

где L – длина пути резания; n – число оборотов дискового ножа при резании на длине L .

Число оборотов дискового ножа определялось при помощи микровыключателя.

На рис. 6 представлены результаты экспериментальных исследований по определению влияния углов захвата α дискового ножа на энергоёмкость процесса резания при фиксированном значении β . Эти зависимости являются па-

раболами с явно выраженными минимумами при $\alpha = 30...40^\circ$. При этом с увеличением угла β значения удельных сопротивлений снижаются менее интенсивно. Это можно объяснить тем, что с увеличением α и β дисковый нож работает в режиме качения с возрастающим скольжением. Значение λ изменялось от 0,5 до 0,8.

В дальнейшем была проведена проверка аналитических зависимостей по определению сопротивления резанию дисковым ножом. Расчет производился с использованием шкалы удельных сопротивлений, разработанной И. А. Недорезовым [11] (для грунтов II категории $k = 0,066$ МПа, а $k_{кл} = 0,85$). Результаты сопоставления (рис. 7) экспериментальной и теоретической зависимостей дают хорошую сходимость (наибольшее отклонение составляет не более 10 %).

Результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность предложенной математической модели косоугольного резания грунта свободно вращающимся дисковым ножом и хорошо согласуются с данными, полученными нами и другими авторами [3, 4].

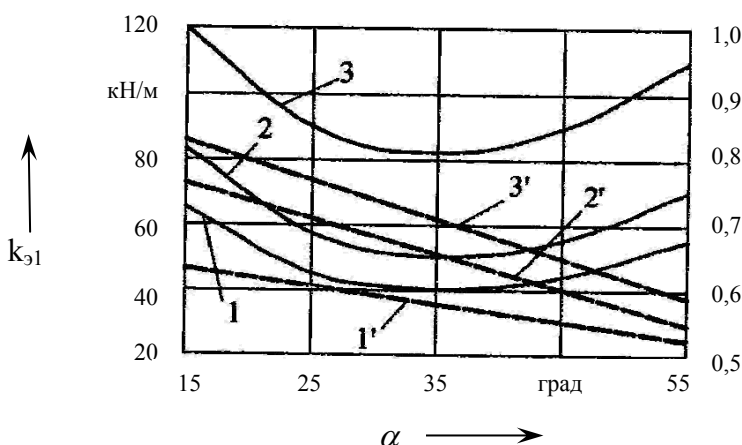


Рис. 6. Влияние угла захвата α на параметры косоугольного резания грунта: — удельное сопротивление резанию $k_{с1}$; --- кинематический параметр λ ; 1, 1' – $\beta = 25^\circ$; 2, 2' – $\beta = 35^\circ$; 3, 3' – $\beta = 45^\circ$; $h = 0,08$ м

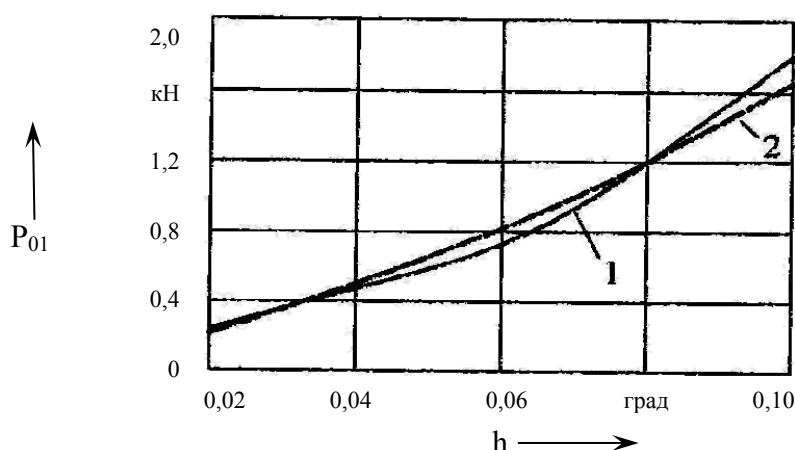


Рис. 7. Зависимость сопротивления резанию от толщины срезаемой стружки h : 1 – экспериментальная; 2 – теоретическая

В месте с тем было установлено следующее:

– эффективность косого резания грунта возрастает в диапазоне углов захвата дискового ножа от 30 до 40° , при этом снижение энергоёмкости резания достигает $30\ldots 40\%$ в сравнении с лобовым резанием;

– режим качения дискового ножа без скольжения (проскальзывания) является наиболее предпочтительным – снижение энергоёмкости достигает $15\ldots 25\%$ в сравнении с резанием жестко закреплённым дисковым ножом.

Таким образом, в результате проведённых исследований были установлены особенности процесса косого резания грунта свободно вращающимся дисковым ножом, разработаны критерии оценки эффективности этого процесса и предложена методика расчёта сопротивлений резанию. Это даёт возможность в более полном объёме использовать результаты ранее проведённых исследований землеройных стругов других авторов в области резания грунтов для решения вопросов проектирования рабочих органов землеройных машин, реализующих принцип косого резания грунта дисковым ножом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов, Ю. М. Испытание чашечного ковша / Ю. М. Гаврилов, Е. В. Курилов, В. В. Никешин // Строительные и дорожные машины. – 1983. – № 2. – С. 5–6.
2. Гаврилов, Ю. М. Бульдозерный отвал с дисковыми секциями. Рабочие процессы и динамика машин для разработки, уплотнения грунтов и вибрационного формования изделий / Ю. М. Гаврилов, Е. В. Курилов, А. М. Сичинава // Межвуз. сб. науч. тр. – Ярославль, 1986. – С. 5–10.
3. Синеоков, Г. Н. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
4. Нартов, П. С. Дисковые почвообрабатывающие орудия / П. С. Нартов. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1972. – 181 с.
5. Недорезов, И. А. Исследование косого резания грунтов. Машины для земляных работ / И. А. Недорезов // Тр. ЦНИИСа. – М., 1969. – Вып. 77. – С. 28–35.
6. Зеленин, А. Н. Косое резание и копанье грунта / А. Н. Зеленин, Л. В. Красильников // Строительные и дорожные машины. – 1967. – № 4. – С. 23–24.
7. Гарбузов, З. Е. К определению нагрузок, действующих на ножевые системы / З. Е. Гарбузов // Тр. Ленинградского филиала ВНИИ стройдормаш. – Л., 1957. – Вып. 1.
8. Эстрин, М. И. О соотношении между составляющими реактивного сопротивления грунта в машинах послойного резания / М. И. Эстрин // Тр. Ленинградского филиала ВНИИ стройдормаш. – Л., 1957. – Вып. 1. – С. 5–9.

9. **Галочкин, Е. Д.** Исследование влияния параметров дискового ножа грейдер-элеватора и режимов его работы на эффективность разработки грунтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1953. – 12 с.

10. **Горячкин, В. П.** Собрание сочинений /

Под ред. Н. Д. Лучинского. – М. : Колос, 1968. – Т. 2. – 445 с.

11. **Недорезов, И. А.** Прогнозирование трудности разработки грунтов землеройными машинами / И. А. Недорезов // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 4. – С. 43–44.

Ярославский государственный технический университет
Материал поступил 12.06.2009

E. V. Kurilov, A. S. Shcherbakov
To the question of efficiency of slanting
cutting the ground with a disk knife

In the article the mathematical model of the process of slanting cutting of ground with a disk knife, criteria of estimation of its efficiency and a method of calculation of resistance to cutting taking into account the rolling mode of the disk knife that has essential importance at designing such working bodies.

УДК 629.113-598.001.66

**И. С. Сазонов, д-р техн. наук, В. А. Ким, д-р техн. наук,
Л. Г. Красневский, д-р техн. наук, А. Т. Скойбеда, д-р техн. наук,
А. М. Захарик, канд. техн. наук, О. В. Билык, канд. техн. наук,
Н. П. Амельченко, канд. техн. наук**

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ О СИЛАХ В АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТОРМОЖЕНИЕМ СЕДЕЛЬНОГО АВТОПОЕЗДА

В работе на основе результатов теоретических исследований дано обоснование эффективности использования силовых факторов в алгоритмах экстренного торможения автопоездов. Результаты моделирования процесса экстренного торможения седельного автопоезда по криволинейной траектории на ПЭВМ подтвердили эффективность использования информации о силах в узлах связи между звеньями поезда и о тормозных моментах на его колесах в алгоритмах управления торможением автопоездов, включающих складывание звеньев машины при торможении.

Проблема внедрения совершенных систем активной безопасности авто-транспортных средств (САБ АТС) напрямую связана с конкурентоспособностью АТС. Мировая практика подтвердила эффективность использования САБ АТС, таких как антиблокировочные системы (АБС), поэтому начиная с 1 октября 1991 г. Директива 71/320 ЕЭС и приложение к Правилам 13 ЕЭК ООН законодательно предписали установку АБС на грузовые автомобили общей массой более 16 т, на прицепы и полуприцепы полной массой более 10 т, автобусы полной массой свыше 12 т.

В последние годы автомобильные фирмы продолжают совершенствовать САБ АТС. Появляются более эффективные системы управления движением АТС, такие как электронные системы стабилизации автомобиля (ESP), системы управления динамикой движения автомобиля и автопоездов, например, VDC и ELB.

Необходимо отметить, что в системе ELB, кроме традиционной информации о кинематических параметрах вращения колес и масс автопоезда, дополнительно используется информация о силах, например, о давлении в тормозном цилиндре, о нагрузках на оси машины. Использование силовой ин-

формации в алгоритме системы ELB позволило обеспечить синхронность срабатывания колесных тормозов всех осей автопоезда.

Анализ текущей информации позволяет утверждать, что ЕЭК ООН в недалеком будущем законодательно примет акт об обязательном использовании ESP, а затем и ELB на автомобилях. Поэтому, чтобы упредить снижение конкурентоспособности отечественной автомобильной продукции, необходимо форсировать научные исследования для создания более эффективных собственных систем управления, отличающихся более низкой стоимостью и патентной чистотой. Тем более это важно в ситуации, когда Республика Беларусь начинает становление производства САБ АТС.

На наш взгляд, поиск создания перспективных САБ АТС кроется в использовании отличных от существующих источников информации – кинематических параметров. То есть новые решения должны быть основаны на использовании более высокоинформативных источников, чем применяемые в современных САБ АТС, которые до сих пор, несмотря на совершенство современных систем управления, традиционно используют кинематические параметры движения масс автомобиля. Са-

мая совершенная современная автоматическая система управления движением колесных машин на основе измерения кинематических параметров движения масс автомобиля производит определение сил в контакте колес с дорогой или же коэффициентов их сцеплений. Так, например, аналитическая база алгоритма VDC, используя измеренные кинематические параметры движения масс АТС на основе велосипедной модели автомобиля и принципа Даламбера, производит расчеты по определению сил в контакте колес с опорной поверхностью или же коэффициентов сцеплений колес. Силы, рассчитанные таким методом, сравнивают с заведомо заданными их пороговыми значениями. При обнаружении превышения расчетных сил заданным пороговым значениям система формирует сигнал управления исполнительными механизмами для достижения желаемых параметров движения АТС. Следовательно, нельзя однозначно утверждать, что алгоритмы таких систем управления адаптивны к изменяющимся характеристикам опорной поверхности и режимам движения автопоезда.

Для создания более совершенного алгоритма управления торможением седельного автопоезда предлагается использовать более высокоинформативные источники – силы в контакте колес машины с опорной поверхностью и в узлах связи между звеньями автопоезда, что позволит создать более эффективные САБ АТС нового поколения.

Для обоснования алгоритма управления на силовом анализе, с известными допущениями, рассматривается математическая модель торможения автопоезда по криволинейной траектории.

Система дифференциальных уравнений курсового движения седельного автопоезда в общем виде может быть представлена в форме уравнения Лагранжа 1-го рода с неопределенными множителями:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_{ij} \ddot{q}_i = \sum_{i=1}^n C_i + \sum_{j=1}^l \lambda_j \frac{\partial f_j}{\partial \dot{q}_i},$$

где i – число обобщенных координат; j – число уравнений связей качения колес; A_{ij} – коэффициенты при старших производных обобщенных координат, зависящие от инерционных характеристик поезда, обобщенных координат, обобщенных скоростей и геометрических параметров машины, $A_{ij} = A_{ij}(m_i, q_i, \dot{q}_i, l_i)$; C_i – некоторая функция от обобщенных координат и обобщенных скоростей, $C_i = f_i(q_i, \dot{q}_i)$; λ_j – неопределенные множители Лагранжа, представляющие собой суть боковые реакции колес со стороны опорной поверхности; $\frac{\partial f_j}{\partial \dot{q}_i}$ –

градиенты от уравнений связей колес с опорной поверхностью.

Для разработки алгоритма управления торможением седельного автопоезда по криволинейной траектории рассматриваются следующие варианты экстренного торможения:

- торможение поезда только колесами полуприцепа;
- торможение поезда только колесами задней оси тягача;
- торможение поезда только колесами передней оси тягача.

При моделировании торможения поезда варьировались значения коэффициентов сцепления его колес с дорогой и начальные скорости торможения. Кроме того, торможение производилось с различными вариантами блокирования колес осей поезда (рис. 1–3).

При торможении седельного автопоезда колесами оси полуприцепа и с начальными скоростями его торможения от 40 до 80 км/ч по опорной поверхности с коэффициентом сцепления $\varphi_{\text{сц}} = 0,8$ тягач практически сохранял заданную траекторию движения в конце торможения. Угол отклонения продоль-

ной оси полуприцепа относительно продольной оси тягача в конце торможения не превышал 12° (см. рис. 1).

При торможении седельного автопоезда путем блокирования задних колес тягача и с начальными скоростями торможения от 40 до 80 км/ч по опорной поверхности с коэффициентом сце-

пления $\phi_{\text{сц}} = 0,8$ тягач не сохранял заданную траекторию движения в конце торможения (см. рис. 2). Угол отклонения продольной оси полуприцепа относительно продольной оси тягача превышал 90° . В то же время сам полуприцеп сохранял заданную траекторию движения в конце торможения.

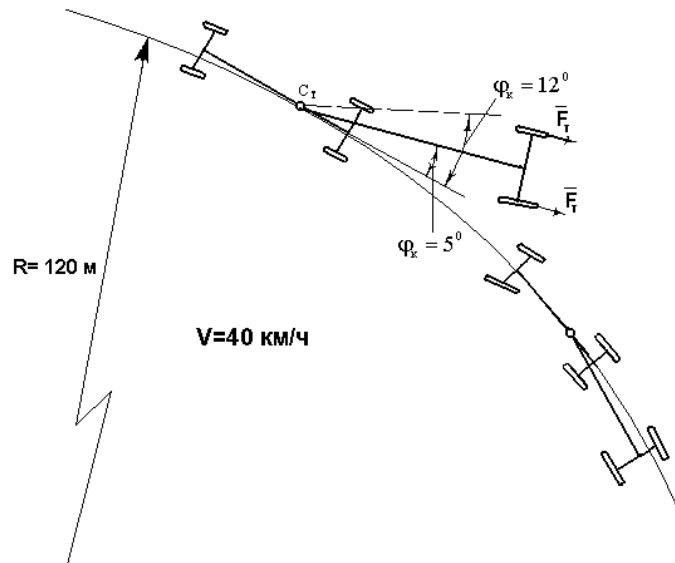


Рис. 1. Схематичное положение звеньев автопоезда при его торможении колесами оси полуприцепа

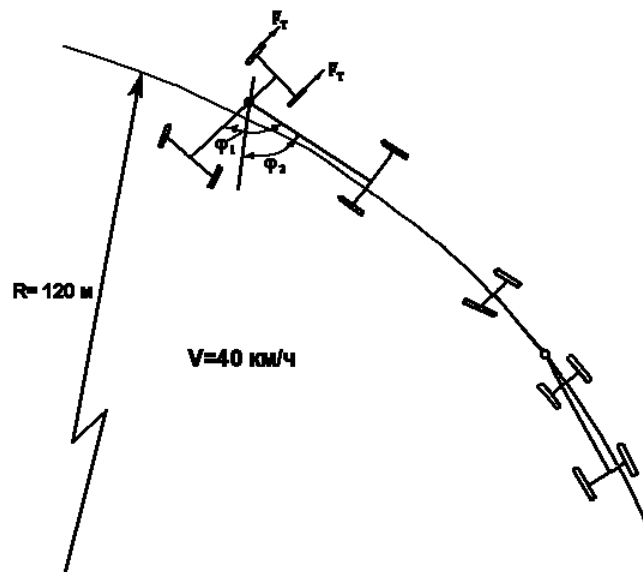


Рис. 2. Схематичное положение звеньев автопоезда при его торможении колесами задней оси тягача

При торможении седельного автопоезда путем блокирования передних колес тягача и с начальными скоростями торможения от 40 до 80 км/ч по опорной поверхности с коэффициентом сцепления $\varphi_{\text{сц}} = 0,8$ ни тягач, ни полуприцеп не сохраняли заданную траекторию движения в конце торможения.

Заметное увеличение изменения разности угловой скорости между продольными осями тягача и полуприцепа происходило в начале торможения. При этом при различных начальных скоростях торможения происходил интенсивный «вынос тягача» от заданной траектории, а разворот полуприцепа происходил к направлению кривизны заданной траектории движения (см. рис. 3). Анализ результатов процесса торможе-

ния седельного автопоезда на ПЭВМ показал, что для создания алгоритма управления, исключающего складывание звеньев автопоезда при его экстренном торможении по криволинейной траектории, использование информации о силах, действующих на шкворень сцепного устройства поезда, и тормозных моментах на колесах представляется более эффективным, чем применение кинематических параметров. Алгоритм управления торможением, основанный на информации о силах и моментах, будет учитывать условия сцепления колес с опорной поверхностью и силы взаимодействия между звеньями поезда и тем самым обеспечит адаптивность системы управления к изменяющимся условиям сцепления.

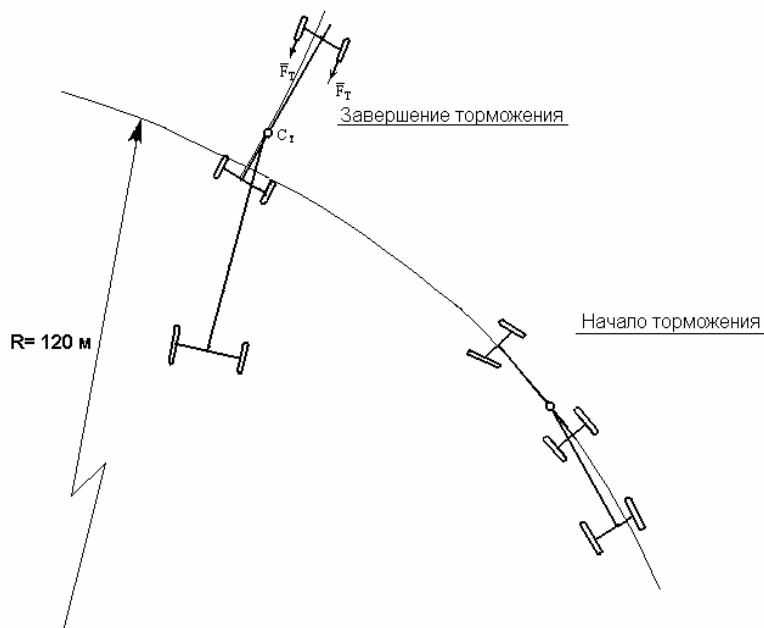


Рис. 3. Схематичное положение звеньев автопоезда при торможении с блокированием колес передней оси тягача

Из анализа результатов исследований экстренного торможения седельного автопоезда можно сделать вывод о том, что алгоритмы управления торможением, основанные на анализе информации о силах взаимодействия в узлах связи между тягачом и полуприцепом, о

тормозных моментах на колесах автопоезда, позволят создать более эффективные САБ АТС. При помощи силовой информации возможно создание алгоритмов управления торможением АТС, исключающих складывание его звеньев. Данное преимущество нового алгорит-

ма будет явным преимуществом перед алгоритмами современных систем управления, т. к. ни один алгоритм современных систем управления не исключает складывание звеньев поезда при экстренном торможении на криволинейной траектории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сазонов, И. С.** Динамика колесных машин / И. С. Сазонов, П. А. Амельченко, В. А. Ким ; под общ. ред. И. С. Сазонова. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – 461 с.

2. **Пат. 3439 (BY), МКИ⁶ В 60Т 8/52.** Способ управления антиблокировочной системой торможения транспортного средства / В. П. Лобах [и др.]. – № 960342 ; заявл. 03.07.96 ; опубл. 30.06.00. – 5 с. : ил.

3. **Пат. 2103191 (RU), МКИ⁶ В 60 Т 8/52.** Способ управления антиблокировочной системой торможения транспортного средства / В. П. Лобах [и др.]. – № 96119735/11 ; заявл. 27.09.96 ; опубл. 27.01.98, Бюл. № 3. – 4 с. : ил.

4. **Пат. 2125517 (RU), МКИ⁶ В 60 К 41/ 00, В 60 Т 1/02.** Способ регулирования режимами движения мобильных машин / В. А. Ким. – № 97119963/28 ; заявл. 03.12.97 ; опубл. 27.01.99, Бюл. № 3. – 18 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материалы поступили 16.06.2009

**I. S. Sazonov, V. A. Kim, L. G. Krasnevsky,
A. T. Skojbeda, A. M. Zaharik, O. V. Bilyk,
N. P. Amelchenko**
**Efficiency of use of the information on forces
in algorithms of control of saddle-type articulated
lorry braking**

In the article, on the basis of the results of theoretical researches, the substantiation about efficiency of use of force factors in algorithms of emergency braking of the articulated lorry is given. The results of modelling of process of emergency braking of articulated lorry on a curvilinear trajectory on PC have confirmed efficiency of use of the information on forces in communication centres between links of a lorry and the brake moments on its wheels in algorithms of braking of the lorry convoys, excluding folding of the links of the car at braking.

УДК 629.113-598.001.66

**И. С. Сазонов, д-р техн. наук, А. Т. Скойбеда, д-р техн. наук,
А. Г. Красневский, д-р техн. наук, В. А. Ким, д-р техн. наук,
О. В. Билык, канд. техн. наук, Н. П. Амелеченко, канд. техн. наук**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СЕДЕЛЬНОГО АВТОПОЕЗДА С УЧЕТОМ ОТРЫВА УПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЕС ТЯГАЧА

В работе представлена математическая модель движения седельного автопоезда, основанная на использовании уравнений неголономных связей, позволяющая решать обратные задачи динамики движения автопоезда (определение реакций связей колес с опорной поверхностью и силы взаимодействия между звеньями автопоезда). Приведены результаты моделирования движения автопоезда в транспортном и тормозном режимах его движения по криволинейной траектории на ПЭВМ. Предложены способы представления результатов моделирования движения автопоезда, дающие оценку устойчивости его движения, и алгоритм управления экстренным торможением, исключающий складывание его звеньев.

При комплексной оценке динамического состояния автопоезда при торможении наибольший интерес представляют исследования силового взаимодействия между звеньями поезда, а также силы в контакте колес с опорной поверхностью. По характеру изменения этих сил можно прогнозировать поведение звеньев автопоезда в последующие моменты времени. Кроме того, анализ изменения указанных сил позволит разработать критерий формирования сигналов управления исполнительными механизмами автопоезда для разработки эффективных алгоритмов управления его движением, повышающих устойчивость, управляемость и безопасность. Основными факторами, влияющими на силы взаимодействия между звеньями поезда и в контакте его колес с опорной поверхностью, являются формируемые водителем сигналы управления: углы поворота управляемых колес, тормозные и тяговые моменты, аэродинамические силы, характеристики опорной поверхности. Все эти факторы отражаются на силах в контакте колес с опорной поверхностью, а предельные значения этих сил, в свою очередь, ограничены физико-механическими свойствами шин и характеристиками опорной поверхности. В настоящей работе поставлена задача исследования влияния стабильно-

сти контактов управляемых колес тягача седельного автопоезда с опорной поверхностью на параметры его курсового движения.

Математическую модель движения автопоезда, с известными допущениями, можно представить в виде двух моделей – модель колебательного движения масс автопоезда (рис. 1, а) и модель курсового движения автопоезда (рис. 1, б).

Колебательная модель позволяет производить спектральный анализ изменений нормальных реакций колес на опорную поверхность. Следовательно, задачей спектрального анализа является прогноз стабильности контакта колес автопоезда с опорной поверхностью. С целью проведения спектрального анализа колебаний нормальных реакций колес используется преобразование Лапласа, которое позволяет определить передаточные функции при нулевых начальных условиях. Оригиналы обобщенных координат, скоростей и ускорений $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$ представляются в форме Лапласа при нулевых начальных условиях в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{q}_i(i\omega) &\rightarrow z_i; \quad i\omega \cdot \bar{q}_i(i\omega) \rightarrow \dot{q}_i; \\ (i\omega)^2 \bar{q}_i(i\omega) &\rightarrow \ddot{q}_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{q}_i(i\omega)$ – общее решение уравнений в

комплексной плоскости; i – комплексное число, $i = \sqrt{-1}$; ω – круговая частота.

Систему уравнений колебаний масс автопоезда с учетом уравнений (1) можно представить в виде

$$\sum_1^i a_i(i\omega) \cdot \bar{q}_i + (i \cdot \omega) \sum_1^i b_i(i\omega) \cdot \bar{q}_i + (i\omega)^2 \sum_1^i d_i(i\omega) \cdot \bar{q}_i = \bar{C}_i(i\omega), \quad (2)$$

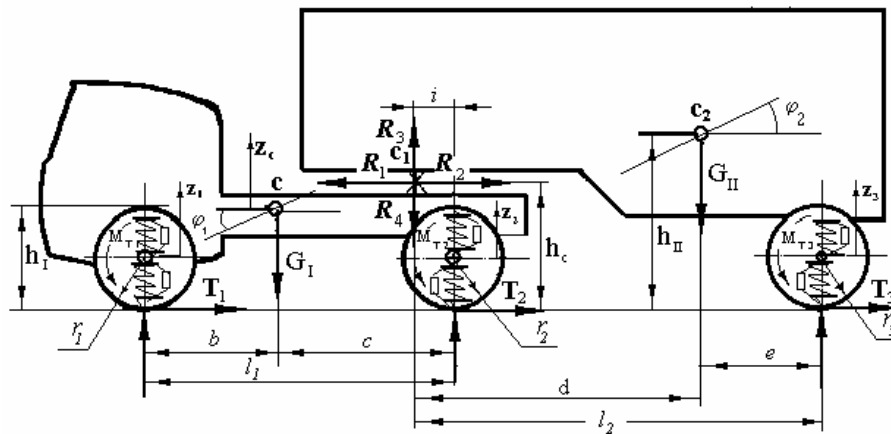
где $a_i(i\omega)$, $b_i(i\omega)$, $d_i(i\omega)$, $\bar{C}_i(i\omega)$ – комплексные параметры.

При проведении расчетов сделаны

допущения: колеса правого и левого бортов машины подвержены воздействиям неровностей опорной поверхности с запаздыванием $\tau_1, \tau_2, \tau'_1, \tau'_2$.

Спектральный анализ колебаний масс показывает, что при движении автопоезда по асфальтобетонному шоссе со скоростью $V = 80$ км/ч диапазон частот воздействия составляет $20 \dots 25$ с⁻¹. В этом диапазоне частот воздействия вероятность разгрузки переднего моста тягача от величины его статической нагрузки составляет 0,45.

а)



б)

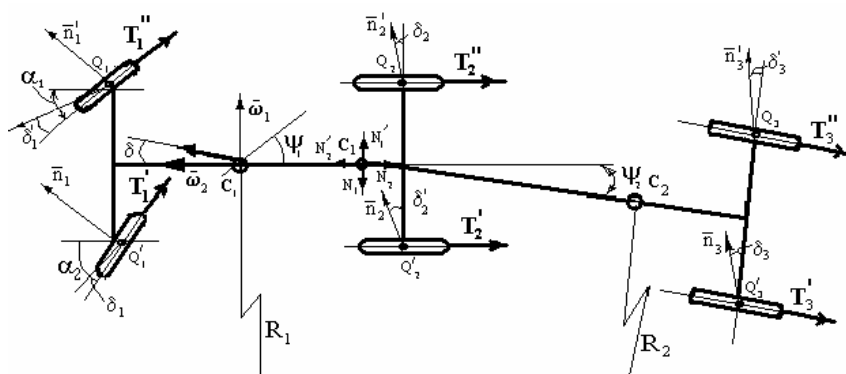


Рис. 1. Расчетные схемы седельного автопоезда

Результаты среднеквадратичных отклонений изменения вертикальной нагрузки на переднем мосту тягача седельного автопоезда приведены на рис. 2.

Совокупность динамических и кинематических уравнений в процессе их решения однозначно определяет положение звеньев автопоезда в любой мо-

мент времени, а также боковые реакции, действующие на колеса автопоезда со стороны опорной поверхности. Такая постановка задачи позволяет решить

прямую и обратную задачи динамики, для которых требуются динамические уравнения и уравнения кинематических связей.

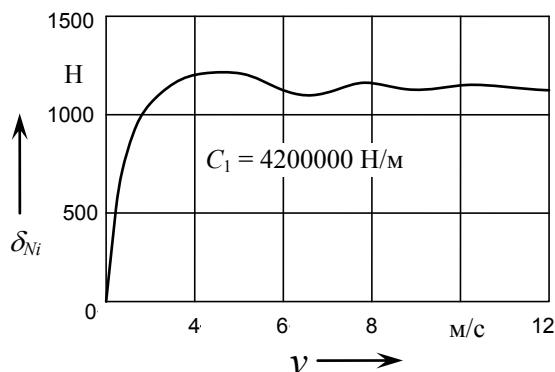


Рис. 2. Изменение среднеквадратичных отклонений нормальной реакции на переднем мосту тягача автопоезда

Система дифференциальных уравнений курсового движения автопоезда с учетом коэффициентов сопротивления уводу шин может быть представлена в виде

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_{ij} \ddot{q}_i = \sum_{i=1}^n C_i + \sum_{i=1}^l \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial \dot{q}_i}, \quad (3)$$

где λ_i – неопределенные множители Лагранжа, представляющие собой суть боковые реакции колес со стороны опорной поверхности; $\dot{q}_i$ – обобщенные скорости; $\frac{\partial f_i}{\partial \dot{q}_i}$ – градиенты от уравнений связей колес с опорной поверхностью; i – число колес автопоезда.

Так как отрыв колес машины можно интерпретировать как частный случай скольжения колес, при котором происходит полная потеря управляемости, то для данных колес уравнения кинематических связей не входят в общее уравнение движения автопоезда. То есть уравнение движения автопоезда с учетом отрыва колес (4) отличается от уравнения (3) тем, что в правой части уравнения исключаются члены с частными производными от уравнений свя-

зей качения колеса. Таким образом, порядок системы дифференциальных уравнений движения автопоезда при отрыве управляемых колес понижается:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_{ij} \ddot{q}_i = \sum_{i=1}^n C_i^{omp} + \sum_{i=1}^m \lambda_m \frac{\partial f_m}{\partial \dot{q}_i}, \quad (4)$$

где λ_m – неопределенные множители от уравнений связей для колес, сохранивших контакт с опорной поверхностью; f_m – уравнения связей колес, сохранивших контакт с опорной поверхностью.

При численном интегрировании уравнений движения поезда с отрывом и без отрыва управляемых колес использовался метод припасовывания. Уравнения движения автопоезда при наличии бокового скольжения отличаются от уравнений (3) тем, что в правой части дифференциальных уравнений $\lambda_m \frac{\partial f}{\partial \dot{q}_i} = \text{const}$, т. е. уравнения связей отпадают. Численные значения этих констант определяются из условия сцепления колес с опорной поверхностью:

$$\lambda_i \leq N_i \cdot \varphi_{icu},$$

где N_i – нормальная реакция i -го колеса на опорную поверхность; φ_{icq} – коэффициент сцепления i -го колеса с опорной поверхностью.

В процессе моделирования, если $\lambda_i < N_i \cdot \varphi_{icq}$ (скольжение пятна контакта колес относительно опорной поверхности), для дальнейших расчетов принимается $\lambda_i = N_i \cdot \varphi_{icq}$. Если $\lambda_i > N_i \cdot \varphi_{icq}$ и $N_i < 0,5N_{icm}$ (N_{icm} – статическая нагрузка на колесо), то подразумевается условный отрыв колес.

Во всех случаях при скольжении и отрыве колес машины исключаются соответствующие уравнения кинематических связей колес, а порядок системы дифференциальных уравнений (4) понижается.

При решении обратных задач динамики возникает необходимость в понижении порядка дифференциальных уравнений движения автопоезда. В этом случае можно воспользоваться квазикоординатами, а переход к обобщенным координатам можно осуществить с помощью матрицы:

$$q^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где q^{-1} – матрица, обратная матрице обобщенных координат q .

Для наглядного представления характера изменения курсового угла тягача, в зависимости от угла поворота его управляемых колес, результаты расчетов на ПЭВМ удобнее представлять в виде фазовых диаграмм (рис. 3 и 4).

На рис. 3 представлена диаграмма изменения угловой скорости вращения продольной оси тягача (изменение зависит от скорости вращения рулевого колеса при движении автопоезда по траектории «змейка» без отрыва (1) и с отрывом управляемых колес (2)).

На рис. 4 представлена диаграмма изменения угловой скорости поворота продольной оси тягача (изменение зависит от угловой скорости поворота управляемых колес тягача при условии отсутствия отрыва и наличии отрыва управляемых колес тягача автопоезда).

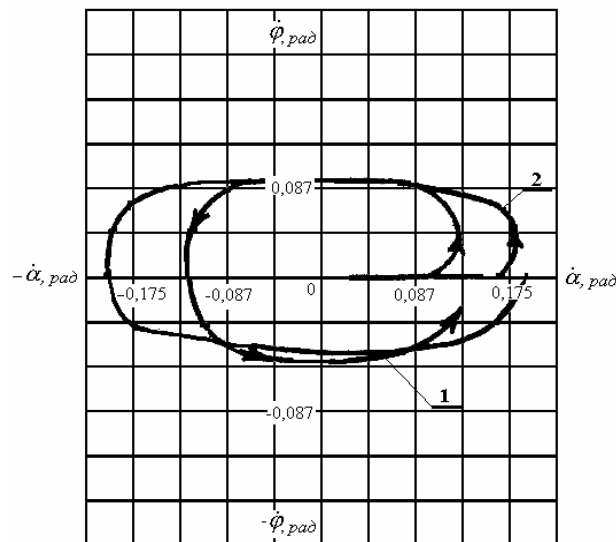


Рис. 3. Диаграмма изменения продольной угловой скорости вращения тягача: 1 – без отрыва колес; 2 – с отрывом колес

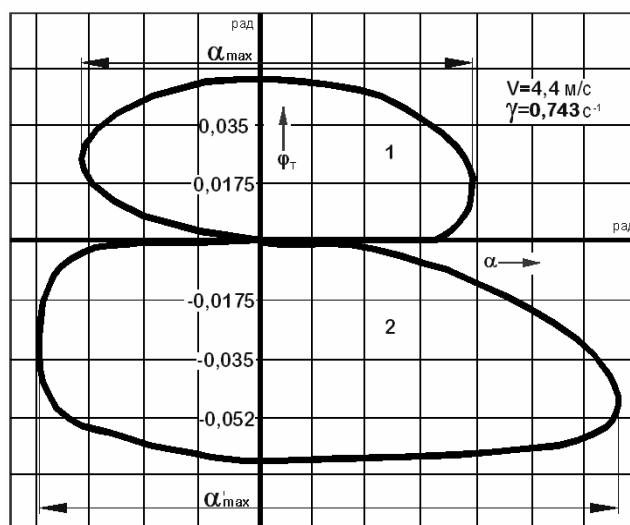


Рис. 4. Фазовая диаграмма изменения угла поворота остова тягача (изменение зависит от угла поворота управляемых колес при совершении поездом маневра «переставка»)

Как видно из рис. 3 и 4, амплитуда скорости поворота управляемых колес тягача заметно возрастает при движении с отрывом (кривая 2) в отличие от движения без отрыва управляемых колес тягача (кривая 1).

Проанализировав рис. 3 и 4, можно сделать вывод, что для удержания поезда на заданных траекториях движения водитель вынужден увеличивать скорость вращения управляемых колес тягача, увеличивая тем самым кривизну траектории центров масс звеньев поезда, что в итоге может привести к боковому скольжению колес. Поэтому при необходимости придания больших угловых скоростей вращения управляемых колес, превышающих физические возможности водителя, для обеспечения устойчивости курсового движения автопоезда необходима автоматическая система стабилизации.

Фазовые диаграммы позволяют наглядно оценить устойчивость и управляемость автопоезда при его движении по криволинейной траектории, а также провести анализ влияния стабильности контакта управляемых колес

с опорной поверхностью на характеристику поворота.

Результаты моделирования показывают, что периоды нечувствительности изменения курсового угла самого тягача заметно возрастают при его движении с отрывом управляемых колес (см. рис. 3 и 4).

Проведенные результаты расчета с относительно большими частотами отрыва управляемых колес ($N = 0,6$ отр./с) показывают, что параметры поворота управляемых колес тягача практически не оказывают влияния на угловые координаты курсового движения звеньев автопоезда, т. е. рассматриваемая система практически не управляема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов, И. С. Динамика колесных машин / И. С. Сазонов, П. А. Амельченко, В. А. Ким. — Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2006. — 461 с.
2. Пат. 2299140 РФ, МКИ⁶ В 60 Т С 1. Способ регулирования торможением автопоезда / И. С. Сазонов [и др.] ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. — № 2005132206/11 ; заявл. 18.10.05 ; опубл. 20.05.07, Бюл. № 14. — 5 с. : ил.

3 Пат. 9589 ВУ, МПК В 60Т 8/00 С1.
Способ регулирования торможением автопоезда
/ И. С. Сазонов [и др.] ; заявитель и патентооб-

ладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № 20041020 ; за-
явл. 11.08.04 ; опубл. 19.04.07, Бюл. № 14. –
5 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 07.07.2009

**I. S. Sazonov, A. T. Skojbeda, A. G. Krasnevsky,
V. A. Kim, O. V. Bilyk, N. P. Amelchenko**
Modelling of movement of saddle-type articulated
lorry taking into account the separation of operated
wheels of the tractor

In the work the mathematical model of movement of a saddle-type articulated lorry, based on use of the equations of nonholonomic constraints, allowing to solve of inverse problems of dynamics of movement of the lorry (definition of reactions of constraints of wheels with a bearing area and forces of interaction between lorry links) is presented. The results of modelling of movement of the lorry in transport and in brake modes of its movement on a curvilinear trajectory on PC are presented. The ways of representation of the results of modelling of movement of the lorry, which make it possible to estimate stability of its movement and algorithm of emergency braking control, excluding folding of its links are offered in the article.

МАШИНОСТРОЕНИЕ . МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621.787

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

ТЕХНОЛОГИЯ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

В статье рассмотрены вопросы обеспечения шероховатости по параметру R_a и формы микрорельефа поверхности при пневмоцентробежной обработке (ПЦО) отверстий пневмоцентробежными раскатниками. Предложена технология пневмоцентробежной обработки отверстий, включающая выбор оборудования, режимов обработки, конструктивных параметров раскатника, технологической оснастки. Приведены обоснования экономической эффективности предложенной технологии.

На основании анализа теоретических основ ПЦО и экспериментальных данных, полученных в результате пневмоцентробежной обработки отверстий деталей из различных материалов, можно выявить закономерности изменения шероховатости и формы микрорельефа поверхности от конструктивных параметров инструмента и режимов обработки. Это позволит систематизировать параметры процесса, что, в свою очередь, даст возможность выбирать оптимальные режимы обработки и конструктивные параметры инструмента, повысит качество обработки и сократит время на проведение опытно-экспериментальных работ.

К основным конструктивным параметрам пневмоцентробежного раскатника, оказывающим влияние на качество обработанной поверхности, относятся количество, форма и диаметры сопел, количество и диаметр деформирующих шаров, радиальный зазор между обрабатываемой поверхностью детали и кольцами пневмораскатника. Технологическими параметрами являются давление в осевой полости пневмоцентробежного раскатника и его осевая подача.

Изменение расположения сопел относительно оси инструмента оказывает большое влияние на угол атаки шара, а следовательно, на изменение радиальной и тангенциальной составляющих результирующей скорости шара [1–3]. Естествен-

но, что с уменьшением расстояния b (рис. 1) частота вращения шаров уменьшается и увеличивается радиальная составляющая силы, действующей на обрабатываемую поверхность, а тангенциальная составляющая этой силы, соответственно, уменьшается. Наибольшую частоту вращения шаров имеют при максимальном значении b .

Анализ результатов измерений показал, что с увеличением количества сопел и давления в осевой полости инструмента частота вращения деформирующих шаров увеличивается, т. к. увеличивается массовый расход воздуха, совершающего работу, необходимую для смятия неровностей. Исследования показали, что большее количество сопел меньшего диаметра, но с одинаковой суммарной площадью их проходных сечений, обеспечивающих постоянный массовый расход воздуха, способствует увеличению частоты вращения шаров. Это объясняется тем, что при меньшем количестве сопел, имеющих больший диаметр, деформирующий шар получает импульс с большей силой, чем при соплах меньшего диаметра.

Отскочив от обрабатываемой поверхности, шар, проходя путь до следующего сопла, расходует часть кинетической энергии, причем сила его воздействия на обрабатываемую поверхность на этом участке меньше, чем в

момент удара.

При увеличении числа сопел, но меньшего диаметра, путь, проходящий шаром до следующего сопла, уменьшается, соответственно, уменьшаются потери кинетической энергии. Увеличение числа импульсов, воздействующих на шар, способ-

ствует увеличению его частоты вращения, несмотря на уменьшение силы, действующей на него, в связи с уменьшением массового расхода воздуха через одно сопло. Смятие неровностей в этом случае происходит более равномерно по всей обрабатываемой поверхности.

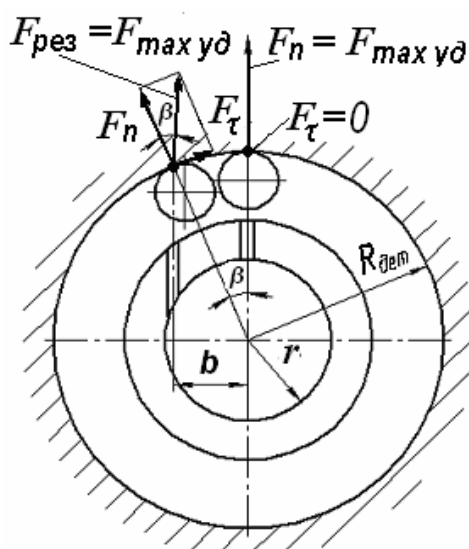


Рис. 1. Схема к расчету составляющих ударной силы шаров

Исследования влияния формы сопел на частоту вращения деформирующих шаров показали (рис. 2), что расположенные по торцу распорных колец сопла с прямоугольным сечением, постоянным по длине, обеспечивают несколько меньшую частоту вращения шаров по сравнению с цилиндрическими соплами, расположенными по центру от торцов распорных колец.

Так, например, при давлении 0,2 МПа частота вращения шаров при использовании сопел прямоугольного сечения составила 100 с^{-1} , а цилиндрических – 105 с^{-1} . Это объясняется тем, что шары совершают больше осциллирующих движений вдоль оси обрабатываемой поверхности, при этом исключается их одноосное вращение.

Наибольшее влияние на частоту вращения оказывают конические сопла с углом конуса 13° , с прямоугольным поперечным сечением (рис. 3). Они

обеспечивают частоту вращения шаров при избыточном давлении 0,2 МПа такую же, как цилиндрические сопла при избыточном давлении в осевой полости инструмента 0,3 МПа [2].

С увеличением радиального зазора между деталью и инструментом давление в камере расширения уменьшается, соответственно, уменьшается и частота вращения шаров. Экспериментальные исследования показали, что при зазоре от 0,6 мм и больше частота вращения шаров практически не изменяется. Изменением зазора можно регулировать частоту вращения шаров в камере расширения, не увеличивая давление в осевой полости инструмента.

Уменьшение частоты вращения шаров сказывается и на качестве обрабатываемой поверхности. Так, например, при обработке чугуновых гильз цилиндров двухрядным пневмоцентробежным раскатником с радиальным зазором между

гильзой и инструментом, равным 0,6 мм, частота вращения шаров составила 28 с^{-1} , а шероховатость поверхности после об-

работки – $Ra 0,8 \dots 1 \text{ мкм}$ при исходной $Ra 2,2 \dots 2,5 \text{ мкм}$.

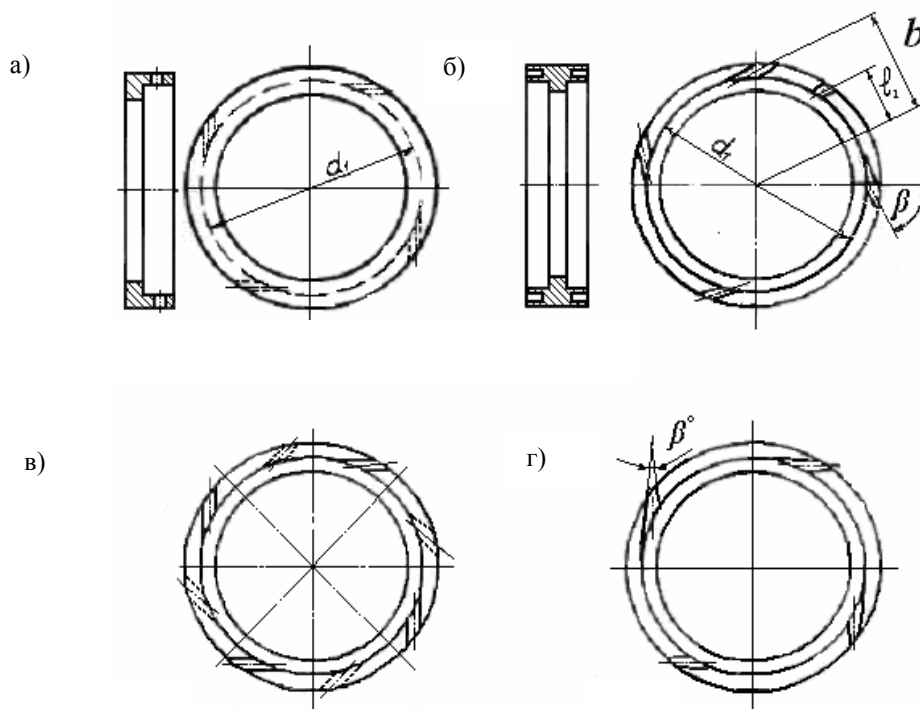


Рис. 2. Форма и расположение сопел в распорных втулках: а – сопла цилиндрические на периферии распорной втулки; б – сопла призматические без смещения на противоположных торцах втулки; в – сопла призматические со смещением на противоположных торцах втулки; г – сопла конические без смещения на противоположных торцах втулки

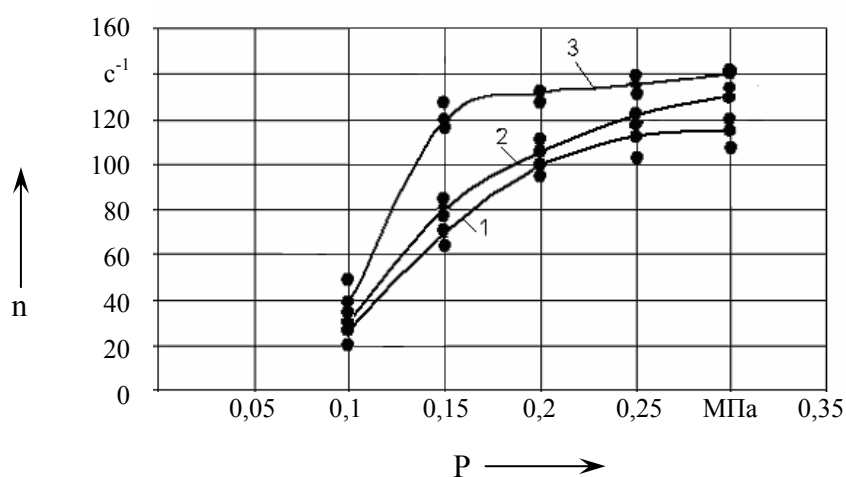


Рис. 3. Влияние давления и формы сопел на частоту вращения шаров: 1 – сопла призматические; 2 – сопла цилиндрические; 3 – сопла с прямоугольным сечением конические (зазор между заготовкой и инструментом $\gamma = 0,3 \text{ мм}$)

Давление в осевой полости инструмента не превышало 0,18 МПа.

При уменьшении радиального зазора до 0,3 мм увеличилось давление в камере расширения и, соответственно, давление в осевой полости инструмента до 0,25 МПа, и частота вращения деформирующих шаров составила 36 с^{-1} . Шероховатость поверхности после обработки составила $Ra 0,5 \dots 0,7 \text{ мкм}$.

Экспериментально установлено, что численные значения частоты вращения шаров находятся в диапазоне от 25 до 140 с^{-1} в рассматриваемом интервале диаметров заготовок 20...120 мм и диаметров шаров 5...13 мм.

Результаты экспериментальных исследований процесса пневмоцентробежной обработки отверстий показывают, что на шероховатость поверхности наибольшее влияние оказывают давление сжатого воздуха в осевой полости и подача инструмента. Так, при давлении сжатого воздуха 0,15...0,3 МПа и подаче 90...150 мм/мин обеспечивается шероховатость поверхности $Ra 0,3 \dots 0,5 \text{ мкм}$ с исходной $Ra 5 \dots 4 \text{ мкм}$. Установлено, что на форму микрорельефа наибольшее влияние оказывает количество сопел и их расположение. Так, при минимальном расстоянии от оси сопел до оси инструмента, при котором происходит вращение шаров вокруг оси инструмента, и количестве сопел от 4 до 6 обеспечивается получение луночного микрорельефа. При максимальном расстоянии от оси сопел до оси инструмента и количестве сопел 8...12 при применении двухрядного раскатника обеспечивается получение регулярного микрорельефа в виде ромбической сетки. При смещении сопел в кольцах, образующих камеру расширения инструмента, возникают осциллирующие движения вдоль оси обрабатываемой заготовки, что способствует уменьшению шероховатости поверхности до $Ra 0,3 \dots 0,24 \text{ мкм}$ и увеличению относительной опорной длины профиля до $t_{40} 93 \%$.

Выбор оборудования и оснастки для пневмоцентробежной обработки отверстий

Упрочняющая пневмоцентробежная обработка отверстий выполняется после чистовой расточки или после черного хонингования с шероховатостью поверхности $Ra 3,2 \dots 2,5 \text{ мкм}$. ПЦО может выполняться как на универсальном оборудовании (токарные, фрезерные, расточные, радиально-сверлильные станки) без применения смазочно-охлаждающих жидкостей, так и на специальном оборудовании. Предпочтительнее использовать станки с вертикальной компоновкой. Для осуществления процесса ПЦО достаточно мощности привода станка 0,5 кВт.

Устанавливаться и закрепляться заготовка может в патронах и других универсальных приспособлениях, а также в специально изготовленном приспособлении (рис. 4), исключающем силовое воздействие зажимных элементов на обрабатываемую заготовку (гильзу).

Выбор режимов обработки

При назначении элементов режимов ПЦО необходимо учитывать твердость обрабатываемого конструкционного материала, исходную и требуемую шероховатости поверхности, требуемую форму микрорельефа, тип оборудования.

Элементы режимов обработки устанавливаются в порядке, указанном ниже.

Подачу $S_{\text{мин}}$ выбирают следующим образом. В зависимости от твердости обрабатываемого материала определяется работа, необходимая для смятия микронеровностей (рис. 5), согласно которой выбирается подача $S_{\text{мин}}$, мм/мин (рис. 6).

Так, например, для обработки изделий с твердостью 65...75 НВ по графику (см. рис. 5) определяем необходимую работу для смятия $A_{\text{см}} = 40 \text{ Дж}$, и по этому значению (см. рис. 6) оптимальное значение подачи для рассматриваемого материала составит 38...40 мм/мин.

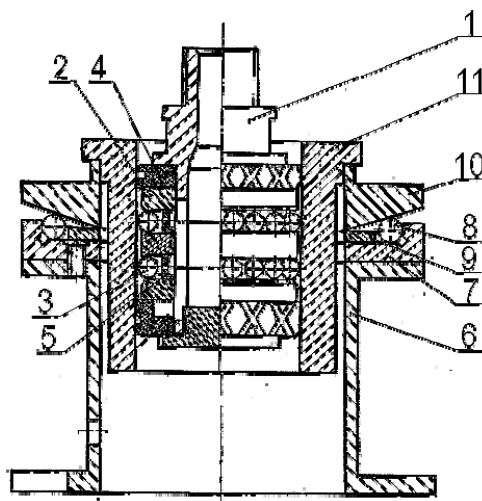


Рис. 4. Пневмоцентробежный раскатник и устройство для обработки гильз цилиндров: 1 – корпус двухрядного шарикового раскатника; 2 – диски; 3 – деформирующие шары; 4 – центрирующие кольца; 5 – распорные втулки; 6 – сварной корпус приспособления; 7 – кольцо; 8 – шарики; 9 – сепаратор; 10 – диск; 11 – обрабатываемая гильза

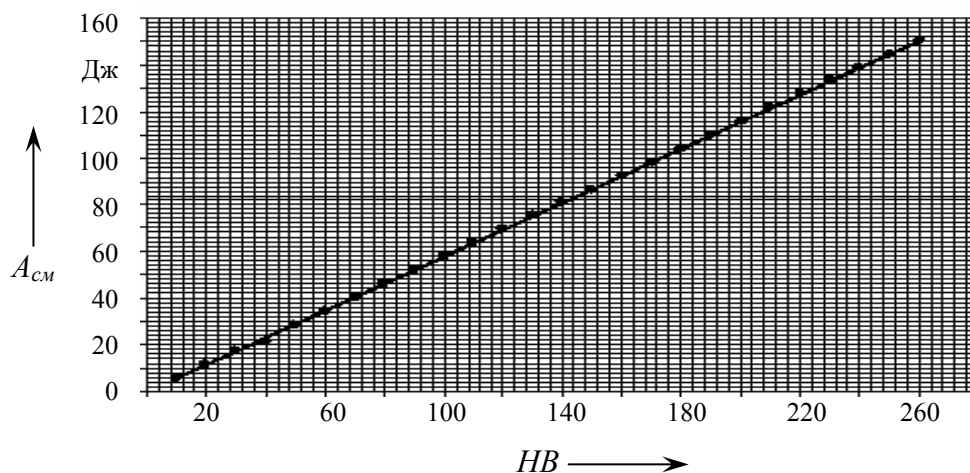


Рис. 5. Зависимость работы, необходимой для смятия микронеровностей, от твердости обрабатываемого материала

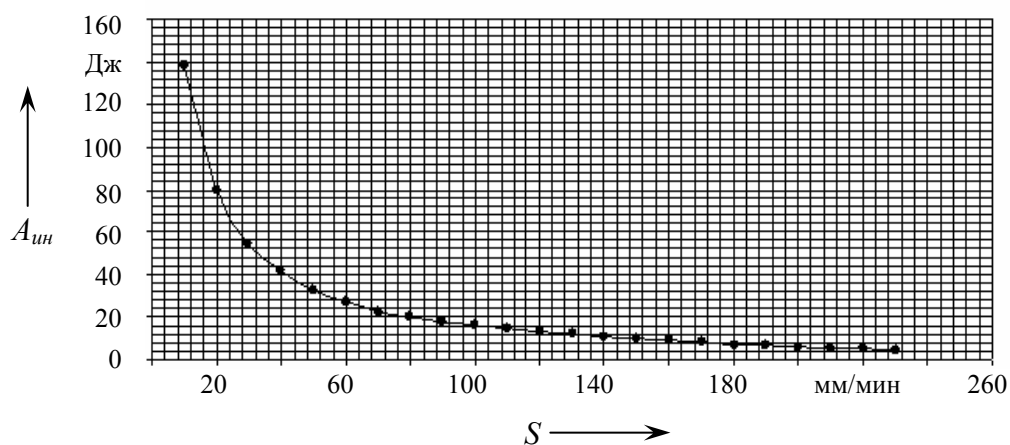


Рис. 6. Зависимость работы, совершаемой инструментом, от подачи

Давление в осевой полости корпуса инструмента P_o выбирают в диапазоне 0,1...0,3 МПа, исходя из требуемой формы микрорельефа и твердости обрабатываемого материала. При обработке цветных металлов принимается меньшее значение давления, а при обработке стали – большее.

Выбор конструктивных параметров раскатника

При выборе конструктивных параметров пневмоцентробежных раскатников необходимо учитывать требуемую форму микрорельефа и диаметр обрабатываемой заготовки.

Конструктивные параметры раскатника устанавливают в порядке, указанном ниже.

Диаметры шаров $d_{ш}$ выбирают в

интервале 5...13 мм в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия, конструкции раскатника и требуемой формы микрорельефа. Обработку отверстий диаметром менее 30 мм рекомендуется проводить однорядным шариковым раскатником [5]. Для обработки отверстий более 30 мм – использовать конструкцию унифицированного двухрядного шарикового раскатника [4]. Диаметры шаров для этих инструментов рекомендуется выбирать по табл. 1.

Форма, расположение, количество z_c и диаметры сопел d_c зависят от формы требуемого микрорельефа и выбираются по табл. 2.

Расположение сопел в распорных втулках раскатника представлено на рис. 2.

Табл. 1. Диаметры шаров

Форма микрорельефа	Диаметр шаров, мм, при диаметре заготовки, мм				
	20...30	30...60		60 и более	
	Однорядный раскатник	1-й ряд шаров	2-й ряд шаров	1-й ряд шаров	2-й ряд шаров
Луночный	5...6	5...6	5...6	5...6	5...6
Регулярный в виде ромбической сетки	—	5...6	7...8	8	10...13
Выглаживающий эффект	—	5...6	7...10	10	12...13

Табл. 2. Форма, расположение, количество z_c и размеры поперечного сечения сопел ($b \times h$ или d_c)

Форма микрорельефа	Количество сопел z_c	Размеры поперечного сечения сопел ($b \times h$ или d_c), мм	Форма сопел	Расположение сопел в распорных втулках раскатника и направление вращения шаров в двухрядном раскатнике
Луночный стохастический	4...6	1×3	Коническая, с углом конуса 13°	На противоположных торцах втулок друг напротив друга и на расстоянии относительно оси инструмента, равном половине наружного диаметра распорного кольца. Вращение шаров – встречное
Регулярный в виде ромбической сетки	8...12	1×3	Коническая, с углом конуса 13°	На противоположных торцах втулок со смещением относительно друг друга и без смещения или на наружной цилиндрической поверхности. Вращение шаров – в противоположных направлениях
		2...3	Цилиндрическая	
Выглаживающий эффект	8...12	1×3	Коническая, с углом конуса 13°	На противоположных торцах втулок со смещением относительно друг друга и на максимально возможном расстоянии от оси инструмента (определяемого конструкцией распорных втулок). Вращение шаров – противоположное

Оптимальный зазор между инструментом и заготовкой γ , от которого зависит наружный диаметр колец раскатника, рассчитывается по зависимости

$$\gamma = \sqrt{\frac{Q_{\text{соп}}^2}{\mu_3^2 P_0 \rho_3 \pi^2 D_{\text{дет}}^2}},$$

где $Q_{\text{соп}}^2$ – массовый расход воздуха через сопла при условии критического истечения, кг/с; μ_3 – коэффициент расхода воздуха через зазор между деталью и инструментом; P_0 – давление в осевой полости инструмента, $P_0 = 0,05 \dots 4$ МПа; ρ_3 – плотность воздуха в зазоре между деталью и инструментом, кг/м³; $D_{\text{дет}}$ – диаметр заготовки, мм.

Расчет ведется на ЭВМ согласно составленному алгоритму в программе EXCEL [2]. Для осуществления расче-

тов в программу необходимо ввести некоторые справочные данные, а также твердость обрабатываемого конструкционного материала, исходную и требуемую шероховатость. К справочным данным относятся представленные ниже параметры.

Коэффициент расхода воздуха: $\mu_c = 0,82$ – для цилиндрических сопел, $\mu_c = 0,92$ – для конических, $\mu_c = 0,87$ – для сопел прямоугольного сечения, для кольцевого зазора между заготовкой и инструментом $\mu_3 = 0,75$.

Коэффициент Пуассона $\mu = 0,32$.

Показатель адиабаты $k = 1,4$.

Давление атмосферное $P_a = 100\,000$ Па.

Коэффициент k' , зависящий от свойств обрабатываемого материала, выбирается по табл. 3.

Табл. 3. Коэффициент k' для различных материалов

Материал	k'
Сталь	0,36
Серый чугун	0,15
Медь	0,48
Бронза	0,46
Алюминий	0,38
Баббит	0,3...0,41

Осуществив выбор режимов обработки и конструктивных параметров инструмента по выше представленным рекомендациям, производят расчет шероховатости R_a и зазора между заготовкой и инструментом γ согласно алгоритму. Для расчета зависимости, определяющей скорость шара до удара (входящей в алгоритм расчета), поправочный коэффициент K_v выбирается по табл. 4 в зависимости от диаметров шаров и заготовки.

Полученная при расчетах шероховатость сравнивается с требуемой. Если эти значения различаются, то входным параметрам (давлению, подаче, диаметрам шаров) придаются некоторые изменения. Вычисления повторяются до тех пор, пока различие между расчетной и требуемой шероховатостью станет несущественным. Окончательно значения конструктивных и технологических параметров принимаются те, которые обеспечивают требуемую шероховатость.

Табл. 4. Значения поправочного коэффициента K_v

Диаметр шаров, мм	Диаметр заготовки, мм												
	22	30	40	45	50	60	65	70	80	90	100	110	120
5	0,241	0,193	0,116	0,149	0,14	0,126	0,12	0,115	0,107	0,10	0,094	0,09	0,085
6	0,209	0,164	0,136	0,125	0,118	0,105	0,10	0,096	0,09	0,084	0,079	0,075	0,071
7	0,185	0,144	0,117	0,108	0,101	0,091	0,086	0,082	0,077	0,072	0,067	0,064	0,061
8	0,169	0,129	0,104	0,096	0,089	0,08	0,076	0,073	0,067	0,062	0,059	0,056	0,053
9	0,159	0,117	0,094	0,086	0,08	0,071	0,068	0,065	0,06	0,056	0,052	0,05	0,047
10	–	0,108	0,086	0,079	0,073	0,065	0,062	0,059	0,054	0,05	0,047	0,045	0,042
11	–	0,102	0,08	0,073	0,067	0,059	0,056	0,052	0,05	0,046	0,043	0,041	0,038
12	–	0,097	0,075	0,068	0,063	0,055	0,052	0,05	0,046	0,042	0,04	0,037	0,035
13	–	–	0,07	0,064	0,059	0,051	0,049	0,046	0,042	0,039	0,037	0,035	0,032

**Технико-экономическая
эффективность применения
разработанной технологии
пневмоцентробежной упрочняющей
обработки для подшипников
скольжения**

На ЗАО «Компрессороремонтный завод» (г. Могилев) была проведена промышленная обработка подшипников скольжения винтовых компрессоров. Материал подшипников – баббит.

Для оценки технико-экономической эффективности применения разработанной технологии пневмоцентробежной упрочняющей обработки для подшипников скольжения винтовых компрессоров был проведен сравнительный анализ затрат на новую технологию ремонта с применением пневмоцентробежной упрочняющей обработки (третья чистовая расточка, используемая для достижения шероховатости поверхности $Ra\ 0,5...0,6$ мкм, была заменена на ПЦО) и базовую. Проведен анализ затрат и экономии по следующим направлениям: экономия расходов на обработку подшипников скольжения и капитальные затраты на внедрение новых технологий и срок их окупаемости.

Трудоемкость новой технологии ремонта была рассчитана для двух вариантов: с использованием математической модели с применением программы расчета на ЭВМ и без применения программы. Всего за год при серийности 50 подшипников в день по первому варианту затраты на финишную операцию составили 1 532 590 р., по второму – 1 344 300 р. Затраты по базовому варианту составляют 6 939 200 р.

Применение разработанной математической модели и унифицированного раскатника для обработки внутренних поверхностей отверстий на ЗАО «Компрессороремонтный завод» позволило снизить трудоемкость финишной операции при обработке подшипников скольжения в 5 раз, сократить затраты на электроэнергию в 35 раз, исключить затраты на эмульсию и получить экономический эффект 5,6 млн р. в год при серийности 50 подшипников в день. Кроме экономического эффекта, полученного за счет сокращения затрат на ремонт, следует ожидать получения косвенного эффекта от повышения надежности и долговечности работы винтовых компрессоров, что позволяет предприятию увеличить срок эксплуатации компрессоров.

Выводы

1. Впервые разработана технология пневмоцентробежной обработки отверстий, позволяющая обоснованно выбирать режимы обработки и конструктивные параметры раскатников с использованием математического моделирования для обеспечения требуемой шероховатости и формы микрорельефа поверхности.

2. Доказана возможность применения разработанной технологии на основании опытно-промышленной проверки и ее внедрения.

3. Годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии, позволяющей прогнозировать и обеспечивать требуемую шероховатость и форму микрорельефа поверхности при упрочняющей пневмоцентробежной обработке отверстий, а также унифицированного пневмоцентробежного раскатника на ЗАО «Компрессороремонтный завод» составил 5,6 млн р. при серийности 50 подшипников в день.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гарлачев, Н. С.** Влияние конструктивных и технологических факторов на частоту вращения шаров пневмоцентробежного раскатника / Н. С. Гарлачев, Е. Н. Антонова // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 41–44.

2. **Гарлачев, Н. С.** Управление шероховатостью и формой микрорельефа при упрочняющей пневмоцентробежной обработке отверстий / Н. С. Гарлачев, Е. Н. Антонова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 1. – С. 76–81.

3. **Антонова, Е. Н.** Обработка внутренних поверхностей тел вращения двухрядным пневмоцентробежным раскатником / Е. Н. Антонова // Сб. науч. тр. членов междунар. Балтийской ассоциации машиностроителей. – Калининград, 2005. – № 5. – С. 59–61.

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

5. **А. с. 1761452 СССР, А2 В 24 В 39/02.** Инструмент для упрочняющей обработки внутренних цилиндрических поверхностей / А. П. Минаков [и др.] (СССР). – № 4754020/27–27 ; заявл. 30.10.89 ; опубл. 15.09.92, Бюл. № 34. – 5 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 22.06.2009

N. S. Garlachov, E. N. Antonova
Management of the roughness and the form of the microrelief at strengthening pneumocentrifugal processing apertures

In the article questions of maintenance of roughness on Ra parameter and forms of a microrelief of the surface are examined at pneumocentrifugal processing of apertures with pneumocentrifugal burnishers. The technology of pneumocentrifugal processing of the apertures, including a choice of the equipment, modes of processing, design factors of the burnisher, industrial equipment is offered. Substantiations of economic efficiency of the offered technology are presented in the article.

УДК 621.833:620.191

Р. М. Игнатищев, д-р техн. наук, проф.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ СИНУСОЭКЦЕНТРИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ

Обоснованы, необходимые в проектированиях, количественные соотношения между основными геометрическими и кинематическими величинами для синусоэксцентрикых передач.

Основная накопившаяся о синусоэксцентрикых передачах (СЭП) информация отражена в [1–10]. Начальные изложения, как правило, оказываются сложными, неполными, логически плохо увязанными, трудно воспринимаемыми читателями и поэтому недостаточно достоверными. Причина этому – отсутствие результатов, появляющихся лишь в последующих исследованиях. Автор

считает, что настало время систематизировать накопленное и дать более упорядоченное изложение отражённых названием статьи вопросов.

Вначале рассмотрим элементарную структурно-кинематическую составляющую СЭП и станочное для неё зацепление. Необходимые для этого изображения представлены на рис. 1.

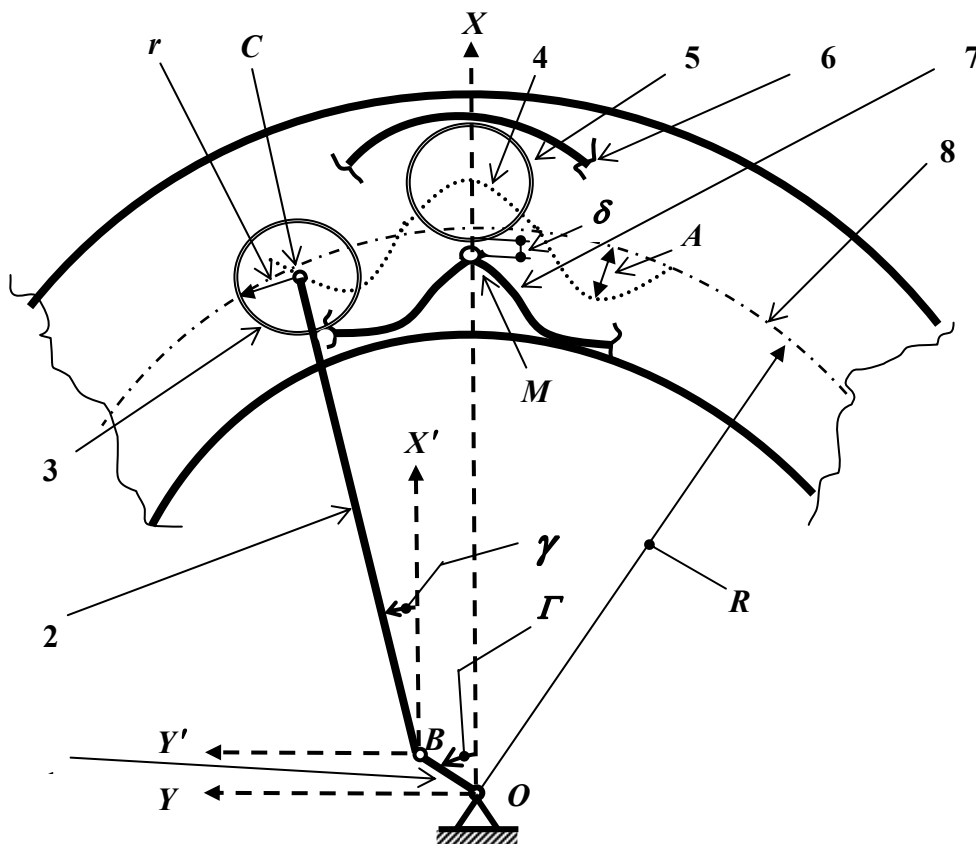


Рис. 1. К составлению аналитического описания кругосинусоид, к пояснениям станочного зацепления и к констатации возможного у этой передачи явления заострения

1–3 – механизм формирования канавок для СЭП. Состоит из последовательно соединённых малого 1 (длина $OB = A$), большого 2 (длина $BC = R$) кривошипов и производящего круга 3 (производящего канавку круга, радиусом r ; при фрезеровании этим кругом является поперечное сечение вращающейся пальцевой фрезы). Положение тел 1–3 определяется углами Γ и γ . 3 – произвольное положение производящего круга. Его центр C при изменениях переменных Γ и γ описывает на плоскости $X'Y'$ окружность, а на XU – линию 4 – кругосинусоиду; XU – неподвижная (иначе – основная, базовая) система отсчёта; $X'Y'$ – система отсчёта с началом во времени, совпадающим с шарниром B , и перемещающаяся поступательно относительно XU . 5 – положение производящего круга в момент формирования центром C максимума кругосинусоиды. 6 – внешняя и 7 – внутренняя границы получающейся канавки (внутренняя и внешняя эквидистанты кругосинусоиды 4). Кругосинусоида является замкнутой, волнообразной (по отношению к окружности 8) линией. Радиус окружности кругосинусоиды 8 оказывается равным длине R большого кривошипа, а амплитуда – длине A малого кривошипа. M – вершина внутренней границы канавки; может получаться срезано-заострённой (это понятие аналогично известным – из теорий зубчатых и кулачковых механизмов); δ – величина среза профиля; срезание считается отсутствующим, если $\delta = 0$.

Пусть Z – полное число волн кругосинусоиды; волна – это часть кругосинусоиды, содержащая три точки своего пересечения с окружностью 8 (см. рис. 1) – одна точка пересечения расположена посередине волны, а две – по концам.

Одно из главных преимуществ СЭП – многопарность зацепления, причём в отличие от промышленно-традиционных случаев эта многопарность распределена по всему углу в 360° (у циклоидно-цевочной же передачи многопарность распределена по углу 180° , а у волновой многопарность хотя и двухсторонняя, что предпочтительней по отношению к циклоидно-цевочной передаче, но имеются пропуски – примерно от 90 до 180° и с 270 до 360°).

Пусть S – полный комплект промежуточных тел, размещаемый в кругосинусоидной канавке (шариков, цевков и пр.; для конкретности, что не влияет на общие результаты, в дальнейшем будем иметь в виду шарики).

Построить СЭП с условием $S = Z$ автору статьи не удалось. Но если $S - Z = \Delta$, то возникает долго мучивший автора вопрос: «какие может принимать значения Δ ?».

Переходим к анализу, дающему ответ на данный вопрос.

Ограничиваемся рассмотрением случая: центры шариков полного их комплекта распределены по углу $2 \cdot \pi$ радиан равномерно, т. е. следуют через каждые $\frac{2 \cdot \pi}{S}$; причём

$$\frac{\Gamma}{\gamma} = \text{const} = \pm S; \quad (1)$$

второе означает: «при равномерном вращении малого кривошипа равномерно вращается и большой кривошип», а также то, что к рассмотрению принимаем два варианта (первый – кривошипы имеют однонаправленное вращение – знак «плюс»; второй – направления вращений кривошипов противоположные – знак «минус»).

Обозначаем также, что

$$\overrightarrow{OC} = \vec{r}.$$

Из рис. 1 видно,
– для варианта $\Gamma = +\gamma \cdot S$

$$\left. \begin{aligned} X &= A \cdot \cos(\gamma \cdot S) + R \cdot \cos \gamma; \\ Y &= A \cdot \sin(\gamma \cdot S) + R \cdot \sin \gamma; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

– для второго варианта

$$\left. \begin{aligned} X &= A \cdot \cos(\gamma \cdot S) + R \cdot \cos \gamma; \\ Y &= -A \cdot \sin(\gamma \cdot S) + R \cdot \sin \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

После возведения в квадраты и сложения уравнений (2) с использованием известных тригонометрических формул получаем

$$\frac{\rho^2 - (R^2 + A^2)}{2 \cdot A \cdot R} = \cos[(S-1) \cdot \gamma].$$

Из (3) аналогично:

$$\frac{\rho^2 - (R^2 + A^2)}{2 \cdot A \cdot R} = \cos[(S+1) \cdot \gamma].$$

Так как R и A величины постоянные, то экстремальные значения переменная ρ принимает при тех же значениях γ , при которых принимает свои максимумы и минимумы функция

$$W = \frac{\rho^2 - (R^2 + A^2)}{2 \cdot A \cdot R},$$

которая для первого варианта равна $\cos[(S-1) \cdot \gamma]$, для второго – $\cos[(S+1) \cdot \gamma]$.

Пусть $\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \dots, \vec{\rho}_i, \dots, \vec{\rho}_S$ – радиус-векторы, определяющие в системе XU положения центров первого, второго и т. д. (последнего номер «S») шариков. Их модули – переменные во времени величины. Переменные и полярные их углы $(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_S)$, но друг от друга эти углы отличаются на постоянные величины. Когда центр шарика находится на вершине кругосинусоиды, модуль его радиус-вектора имеет максимальное значение.

Ясно, что $\rho_{1\max} = \rho_{2\max} = \dots = \rho_{S\max} = A + R$.

Значения полярных углов в моменты прохождения центрами шариков вершин кругосинусоид (что происходит в различные моменты времени) определяются из выражений:

– при первом варианте

$$\gamma_{i\max} = \frac{2 \cdot \pi}{S-1} \cdot (i-1); \quad (4)$$

– при втором варианте

$$\gamma_{i\max} = \frac{2 \cdot \pi}{S+1} \cdot (i-1). \quad (5)$$

При этом, что отображено выражениями (4) и (5), угловые расстояния между каждой парой соседних векторов ρ_i и $\vec{\rho}_{i+1}$ ($i=1, \dots, S$) одинаковы:

– при первом варианте

$$\Delta\gamma = \frac{2 \cdot \pi}{S-1};$$

– при втором варианте

$$\Delta\gamma = \frac{2 \cdot \pi}{S+1}.$$

То есть число Z волн кругосинусоиды с числом S шариков оказывается связанным следующими соотношениями ($2 \cdot \pi$ радиан делится на угловой шаг $\Delta\gamma$):

– при варианте «сонаправленные вращения кривошипов»

$$Z = S - 1; \quad (6)$$

– при варианте «противоположные вращения кривошипов»

$$Z = S + 1. \quad (7)$$

Итак, кругосинусоиды, в удобных для вертикально-фрезерных станков с ЧПУ переменных (для набора программ нарезания канавок для СЭП), принимают вид:

– при использовании первого варианта зацепления

$$\left. \begin{aligned} X &= A \cdot \cos \Gamma + R \cdot \cos \left(\frac{Z+2}{Z+1} \cdot \Gamma \right); \\ Y &= A \cdot \sin \Gamma + R \cdot \sin \left(\frac{Z+2}{Z+1} \cdot \Gamma \right); \\ 0 \leq \Gamma &\leq (Z+1) \cdot 2\pi; \end{aligned} \right\} \Leftarrow S=Z+1; \quad (8)$$

– при использовании второго варианта зацепления

$$\left. \begin{aligned} X &= A \cdot \cos \Gamma + R \cdot \cos \left(\frac{Z-2}{Z-1} \cdot \Gamma \right); \\ Y &= A \cdot \sin \Gamma + R \cdot \sin \left(\frac{Z-2}{Z-1} \cdot \Gamma \right); \\ 0 \leq \Gamma &\leq (Z-1) \cdot 2\pi; \end{aligned} \right\} \Leftarrow S=Z-1. \quad (9)$$

(8) и (9) относятся к известному классу эпициклоид и гипоциклоид; их формы широко рассмотрены в математической литературе.

Традиционные аналитические исследования форм кругосинусоид целесообразно вести в относительных еди-

ницах (что позволяет на единицу понижать число переменных), т. е. традиционно используемые аналитическо-числовые исследования, например первого варианта зацепления, целесообразно проводить по уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} X &= \cos \Gamma + \lambda \cdot \cos \left(\frac{Z+2}{Z+1} \cdot \Gamma \right); \\ Y &= \sin \Gamma + \lambda \cdot \sin \left(\frac{Z+2}{Z+1} \cdot \Gamma \right); \\ 0 \leq \Gamma &\leq (Z+1) \cdot 2\pi; \end{aligned} \right\} \Leftarrow S=Z+1; \quad \lambda = \frac{R}{A}.$$

В СЭП-зацеплениях необходимо уметь анализировать не только кругосинусоиды, но также величины срезания δ . Важным параметром СЭП, влияющим на КПД, является и средний угол заострения вершин (и впадин) канавок; эти углы целесообразно иметь в интервалах $60 \dots 90^\circ$; большего сообщить автор пока не может из-за малой накопленности результатов исследований в этом направлении.

Автору не удалось обобщающе-аналитически описать эквидистанты кругосинусоид (с целью последующего традиционно-аналитического их исследования). Но они относительно несложно поддаются компьютерному графоаналитическому исследованию (использовалась программа Excel), что иллюстрировано на рис. 2 (где h – это выраженный в долях A радиус r производящего круга).

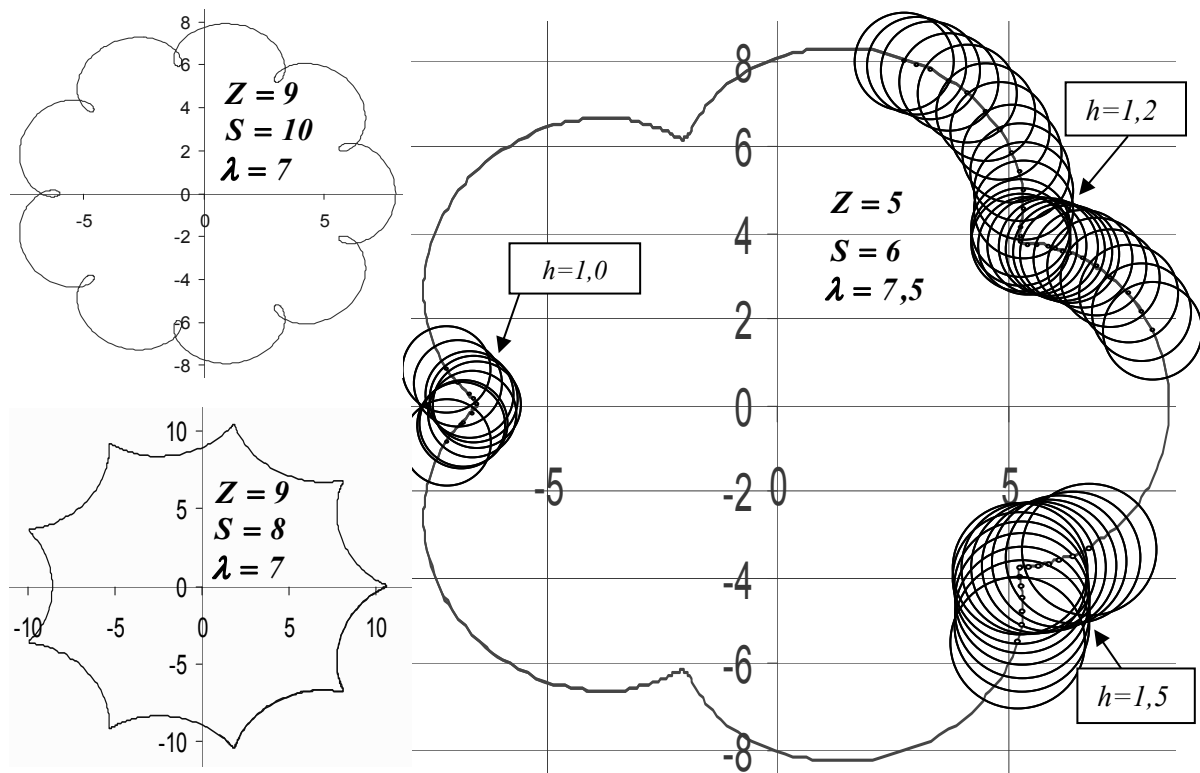


Рис. 2. Примеры кругосинусоид, фрагменты исследования углов заострения вершин и их срезов

Изложенный метод позволяет составить многотомную книгу из результатов таких исследований, но автор не увидел пока в этом необходимости – считает более практичным проводить такие многофакторные исследования непосредственно на станках с ЧПУ в процессе создания *конкретных* экспериментальных и промышленных образцов СЭП.

Из пар зацепляющихся шестерён построено огромное число различных структур зубчатых механизмов, в частности планетарных. Также немалое количество различных редуцирующих устройств можно построить и из рассмотренного простейшего зацепления кругосинусоидной канавки с промежуточными телами (шариками, роликами, надетыми на них игольчатыми подшипниками и т. д.). При этом, подобно синусошариковым передачам (незаменимым при создании редуцирующих узлов, располагаемых в скважинах малого

диаметра – 127 мм и менее), для СЭП также имеются пока не освоенные, но доступные им ниши; в частности СЭП открыли перед конструкторами новые компоновочные возможности, например, позволили создавать вписывающиеся в щели редуцирующие узлы для преобразования моментов при больших передаваемых мощностях (дискообразные, малой толщины, с ведущим валом в виде шкива ремённой передачи, приводимой двигателем, располагаемым за пределами щели). С рядом других оригинальных конструктивных решений, найденных на основе простейшего зацепления кругосинусоидной канавки с промежуточными телами, можно ознакомиться в [1–10].

Но редуцирующие устройства, синтезированные из простейших зацеплений кругосинусоидных канавок с промежуточными телами и часто имеющие более высокие несущую способность, долговечность и КПД, своей простотой

(мало число деталей и все они имеют простые технологии изготовления – меньшей себестоимостью) вытеснят многие зубчатые передачи из традиционно занятых ими эксплуатационно-промышленных ниш. Основную задачу данной статьи автор видит в целесообразности впервые доступно-доказательно изложить своим преемникам кинематику приоритетной (особенно для начальной стадии инновационного процесса) разновидности СЭП – её изображение, адаптированное под решение поставленной задачи, представлено здесь на рис. 3; достоинства подробно описаны в [11, с. 29–33], а ряд технологических аспектов изложен в [10].

Представленная на рис. 3 разновидность СЭП составлена из двух простейших зацеплений кругосинусоидных канавок с промежуточными телами, имеющих общее водило. *a* – неподвижная канавка = корпус с кругосинусоидной канавкой. *b* – эксцентрик = объединённые в одно звено малые кривошипы (с противовесами). *c* – водило = объединённые в одно звено два больших кривошипа, каждый со своим рядом шариков: один ряд шариков расположен в неподвижной канавке, второй – в подвижной. *d* – подвижная канавка = ведомый вал с кругосинусоидной канавкой.

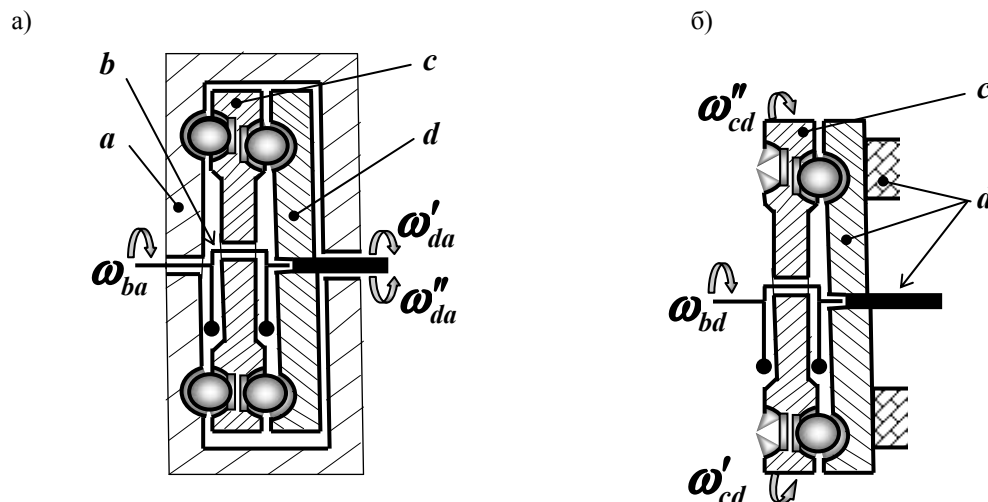


Рис. 3. Конструктивная схема приоритетной СЭП (а) с фрагментом её изображения (б), используемого для вывода формулы передаточного отношения

Обозначения: ω – угловая скорость звена; первый символ в индексе при ω идентифицирует звено, об угловой скорости которого ведётся речь; второй символ идентифицирует систему отсчёта, в которой находится человек, оценивающий величину этой угловой скорости. Например, ω_{cd} – это угловая скорость звена «с» (водила) относительно звена «d» (относительно подвижной кругосинусоиды).

На основании закона сложения угловых скоростей и принятого выше условия станочного зацепления (1) записываем:

$$\begin{aligned} \vec{\omega}_{ba} &= \vec{\omega}_{da} + \vec{\omega}_{bd}, \quad \vec{\omega}_{bd} = \\ &= \pm S_d \cdot \vec{\omega}_{cd} \Rightarrow \frac{\vec{\omega}_{ba}}{\pm S_d} - \frac{\vec{\omega}_{da}}{\pm S_d} = \vec{\omega}_{cd}; \quad (10) \end{aligned}$$

$$\vec{\omega}_{da} = \vec{\omega}_{ca} + \vec{\omega}_{dc}, \quad \vec{\omega}_{ba} = \pm S_a \cdot \vec{\omega}_{ca} \Rightarrow \vec{\omega}_{da} - \frac{\vec{\omega}_{ba}}{\pm S_a} = \vec{\omega}_{dc}. \quad (11)$$

Из (10) и (11) следует:

$$\vec{\omega}_{ba} \cdot \left(\frac{1}{\pm S_d} - \frac{1}{\pm S_a} \right) + \vec{\omega}_{da} \cdot \left(1 - \frac{1}{\pm S_d} \right) = 0.$$

Откуда

$$i = \frac{\vec{\omega}_{ba}}{\vec{\omega}_{da}} = \frac{\frac{1}{\pm S_d} - 1}{\left(\frac{1}{\pm S_d} - \frac{1}{\pm S_a} \right)}. \quad (12)$$

СЭП работоспособны при неполных комплектах шариков и поэтому формулы для вычисления их передаточных отношений U целесообразно выражать через числа волн кру-госинусоид. Из (12) следует:

$$\boxed{\begin{matrix} S_a = Z_a + 1 \\ S_d = Z_d + 1 \end{matrix}} \Rightarrow i = \frac{\vec{\omega}_{ba}}{\vec{\omega}_{da}} = \frac{Z_d \cdot (Z_a + 1)}{Z_d - Z_a}, \quad (13)$$

$$\boxed{\begin{matrix} S_a = Z_a - 1 \\ S_d = Z_d - 1 \end{matrix}} \Rightarrow i = \frac{\vec{\omega}_{ba}}{\vec{\omega}_{da}} = \frac{Z_d \cdot (Z_a - 1)}{Z_a - Z_d}. \quad (14)$$

Третий и четвёртый варианты дают меньшие значения передаточных чисел.

Формула вычисления передаточных отношений, объединяющая все варианты рассмотренной СЭП (приоритетной для начала инновационного процесса):

$$i = \frac{\vec{\omega}_{ba}}{\vec{\omega}_{da}} = \pm \frac{Z_d \cdot (Z_a \pm 1)}{Z_d - Z_a}. \quad (15)$$

Можно в одной ступени получать практически любые значения передаточных чисел. В частности: 36, 44, 49, 56, 64, 77, 81, 91, 100, 121, 133, 144, 153, 169, 175, 196, 225, 255, 280, 340, 408, 435, 495, 615, 736, 900, 1024 и т. д.

Приведенный ряд начат с числа «39» с целью акцента на том, что инновационный процесс целесообразно начинать с соревнования не с одно- и даже не с двухступенчатыми зубчатыми передачами, а с пяти- (и выше), четырёх- и трёхступенчатыми (тогда более выразительно будут видны себестоимостные преимущества СЭП).

Для рассмотренной приоритетной СЭП при выполнении [9] изготавливались, в цевочном исполнении, а затем испытывались три опытных образца. Проведенная опытная проверка полностью подтвердила изложенные геометрические и кинематические результаты.

Итак, статья содержит материал, достаточный для начала инновационного процесса для нового семейства редукторных передач. Конструкторам дано практически всё минимально необходимое для создания опытно-промышленных образцов синусоэксцентриковых редуцирующих устройств, которые открыли новые компоновочные возможности, недоступные известным передачам, в частности, позволили создавать вписывающиеся в щели редуцирующие узлы с большими передаваемыми мощностями, и которые своей простотой (малым числом деталей и их технологичностью – меньшей себестоимостью), а часто более высокой несущей способностью, долговечностью, КПД, преимуществами в миниатюризации и в решении задач точности позиционирования исполнительных органов вытеснят многие зубчатые передачи из традиционно занятых ими эксплуатационно-промышленных ниш.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1216498 SU, МПК F 16 H 13/08. Планетарная передача / Р. М. Игнатищев. — № 3795289 ; заявл. 02.10.84 ; опубл. 07.03.86, Бюл. № 9. — 2 с. : ил.
2. А. с. 1704531 SU, МПК F 16 H 13/08, 1/32. Планетарная передача / Р. М. Игнатищев. — № 43122275 ; заявл. 17.07.87 ; опубл. заказ 85/ДСП. — 6 с. : ил.

3. А. с. 1788826 SU, МПК F 16 H 1/34, 25/06. Планетарная передача / Р. М. Игнатищев. — № 4419685 ; заявл. 03.05.88 ; опубл. заказ 11/ДСП. — 6 с. : ил.
4. Пат. 4045 ВУ, МПК F 16 H 1/00. Синусоэксцентриковая передача / Р. М. Игнатищев. — № u 20070369 ; заявл. 14.05.07 ; опубл. 30.12.07 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. — 8 с. : ил.
5. Пат. 4255 ВУ, МПК F 16 H 1/00. Синусоэксцентриковая передача для привода гибких связей / Р. М. Игнатищев. — № u 20070572 ; заявл. 02.08.07 ; опубл. 28.02.08 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. — 6 с. : ил.
6. Пат. 4305 ВУ, МПК F 16 C 3/00, F 16 D 17/00, F 16 H 25/00. Синусоэксцентриковая передача для отсчётных устройств и позиционирования / Р. М. Игнатищев. — № u 20070598 ; заявл. 17.08.07 ; опубл. 30.04.08 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. — 6 с. : ил.
7. Пат. 4306 ВУ, МПК F 16 H 3/00, B 60 K 17/00. Синусоэксцентриковая коробка передач / Р. М. Игнатищев. — № u 20070584 ; заявл. 09.08.07 ; опубл. 30.04.08 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. — 7 с. : ил.
8. Пат. 4317 ВУ, МПК F 16 H 1/32, F 16 H 59/00, H 02 K 7/00. Синусоэксцентриковый мотор-редуктор / Р. М. Игнатищев. — № u 20070591 ; заявл. 14.08.07 ; опубл. 30.04.08 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. — 6 с. : ил.
9. Создание научных, конструкторских и технологических предпосылок для разработки и разработка экспериментальных образцов синусоидальных редуцирующих узлов малых габаритов с передаточным отношением из интервала 100–1000 : отчёт о НИР (заключ.) / Могилёв. машиностр. ин-т ; рук. Р. М. Игнатищев ; исполн. : А. И. Крез [и др.]. — Могилёв, 1991. — 29 с. : ил. — Библиогр. : с. 29. — № ГР 0191.0007220. — Инв. № 03920005292.
10. Игнатищев, Р. М. Шестерням весома́я поддержка — синусоэксцентриковые передачи / Р. М. Игнатищев. — Могилёв : УПКП МОТ им. Спиридона Соболя, 2007. — 24 с. : ил.
11. Игнатищев, Р. М. Руслану Игнатищеву 70 лет — жизнь прожита в науке — эстафета молодым / Р. М. Игнатищев. — Могилёв : УПКП МОТ им. Спиридона Соболя, 2009. — 36 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 27.05.2009

R. M. Ignatishev
The basic results of researches for geometrical and kinematic calculations of sine-and-eccentric motions

Quantitative ratio between the basic geometrical and kinematic values for sine-and-eccentric motions, necessary in projecting, are grounded in the article.

УДК 669.017

Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, доц., Ф. Г. Ловшенко, д-р техн. наук, проф.,
З. М. Ловшенко, канд. техн. наук, доц.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изучено влияние условий механического легирования на свойства высокопрочных наноструктурных никелевых материалов с интерметаллидным и оксидным упрочнением и проведена оптимизация процесса.

Технологический процесс получения механически легированных материалов включает: подбор исходных компонентов, обработку шихты в механореакторе и получение механически легированной гранулированной композиции, отжиг композиции, изготовление полуфабрикатов горячим прессованием. Наиболее важным этапом является обработка шихты в механореакторе. Несмотря на некоторые изменения на последующих технологических этапах, фазовый состав, структура и свойства механически легированных композиций, в основном, наследуются конечным продуктом – компактным материалом. Анализ результатов исследований в этой области [1–3] позволяет установить общие закономерности формирования дисперсно-упрочненных наноструктурных механически легированных материалов, в том числе и никелевых, являющихся надежной научной базой при оптимизации технологического процесса и заключающихся в следующем.

При обработке порошковой шихты в механореакторе параллельно протекают процессы накопления дефектов кристаллического строения, вызывающие разрушение частиц, и происходит последующая сварка осколков, сопровождающаяся диффузией. Сварке предшествуют адгезия и агломерация по ювенильным поверхностям разрушаемых частиц. В результате многократно повторяющихся разрушений и сварки осколков формируется гранулированная

композиция, в которой исходные компоненты или продукты их взаимодействия связаны и равномерно распределены по объему.

На начальном этапе обработки, как правило, превалирует разрушение, в последующем – адгезия, агломерация и сварка, в результате протекания которых средний размер гранул непрерывно увеличивается. В дальнейшем между сваркой и разрушением устанавливается динамическое равновесие, размер гранул стабилизируется. Основными факторами, оказывающими влияние на приведенный процесс, являются природа обрабатываемых материалов и энергонапряженность режима обработки. Они определяют характер и развитие механически активируемых превращений, влияющих как на упрочнение композиционных частиц, так и на кинетику изменения размера гранул. В зависимости от исходного состава системы, подвергаемые механическому легированию, делятся на три группы. К первой относятся композиции, в которых механически активируемые фазовые превращения незначительны. Упрочнение в них происходит, в основном, за счет измельчения структуры основы, а также частиц легирующего компонента, и величина его относительно невелика. Во-второй получают заметное развитие механохимические превращения, вызывающие образование наноразмерных упрочняющих фаз. Эффект упрочнения композиций в этом случае

достаточно высок. Для третьей группы характерно высокое упрочнение композиций, обусловленное активно протекающими механохимическими превращениями и сочетающее, как правило, дисперсное, дисперсионное и твердорастворное.

Вышеприведенный процесс формирования гранулированных композиций в наибольшей мере характерен для второй группы. В композициях первой группы, к которым относятся системы на основе мягких и пластичных металлов, например, алюминия, меди, с небольшим количеством низкоактивных легирующих добавок, первая стадия процесса – измельчение исходных компонентов не получает развития. В этом случае сварка превалирует над разрушением и размер образовавшихся композиционных гранул в процессе обработки непрерывно увеличивается. Особенностью формирования механически легированных композиций третьей группы, к которым относятся и разрабатываемые дисперсно-упрочненные никелевые материалы, является то, что после первичной грануляции разрушение начинает превалировать над сваркой и размер гранул уменьшается, стабилизируясь на определенном этапе обработки.

Формирование структуры основы при механическом легировании происходит в результате протекания динамической рекристаллизации. На начальной стадии размол в частицах происходит увеличение дефектности кристаллического строения. В течение 1...2 ч обработки в механореакторе плотность дислокаций повышается до значений не ниже 10^{12} см^{-2} . Достигнув критической величины, они перестраиваются, образуя соответствующие субструктуры. При большой плотности дефектов возникают фрагментированные зерна. С увеличением степени деформации размер фрагментов уменьшается, а угол разориентировки между ними возрастает. Границы между фрагментами становятся большеугольными. Фрагментация

приводит к измельчению кристаллитов до значений, не превышающих 100 нм. Плотность дислокаций при этом уменьшается. Субмикроструктурная структура с большой протяженностью поверхности раздела между компонентами способствует образованию центров кристаллизации новых фаз и ускоряет процесс их формирования.

Высокая стойкость материалов, работающих в широком температурном интервале, верхний предел которого составляет $0,85T_{\text{пл}}$, достигается комплексным легированием, обеспечивающим сочетание твердорастворного дисперсионного, дисперсного и зернограницного упрочнения. Для получения дисперсно-упрочненных материалов на основе металлов перспективны системы «основной металл – кислородосодержащее соединение – элемент, имеющий высокое сродство с кислородом». В качестве второго компонента эффективно использование ряда оксидов, обладающих низкой термодинамической стабильностью. При обработке шихты в механореакторе в композициях происходят термодинамически разрешенные фазовые механохимические превращения, вызывающие образование твердых растворов и соединений. Окислительно-восстановительные процессы активно протекают при энергии Гиббса взаимодействия $\leq -200 \text{ кДж/моль}$ атомов кислорода.

В материалах конструкционного назначения, имеющих относительно невысокую концентрацию легирующих компонентов, для развития механически активируемого взаимодействия между ними, по меньшей мере, один из них, как правило, легирующий металл должен обладать достаточно высокой растворимостью в основе.

Механически легированные композиции являются термодинамически неравновесными дисперсно-упрочненными системами, основа которых представляет собой неомогенный твердый раствор со структурой нанометрическо-

го типа с большой протяженностью границ зерен и субзерен, стабилизированных ультрадисперсными выделениями ($d < 5$ нм) механически синтезированных соединений. Они, как правило, относятся к промежуточным фазам, рентгеноаморфны и в зависимости от природы приводят к дисперсионному или дисперсному упрочнению. Первое обусловлено наличием интерметаллидов, второе – термодинамически стабильных оксидов. При этом роль упрочняющих фаз заключается в стабилизации границ зерен и субзерен, величина поверхности которых и определяет, в основном, степень упрочнения. Структура характеризуется следующими параметрами: размер зерен ≤ 100 нм, размер блоков ≤ 50 нм, плотность дислокаций $\leq 10^{11}$ см⁻². Во всех случаях в структуре присутствуют дисперсные включения ($d < 0,1$ мкм) исходных легирующих компонентов шихты в количестве, не превышающем 30 % от исходного.

Для стабилизации фазового состава, структуры и свойств механически легированных композиций обязательной операцией является отжиг, который может сочетаться с термомеханической обработкой. При этом протекают такие физико-химические процессы, как диффузия, рекристаллизация, растворение включений, выделение и рост новых фаз и другие, способствующие переходу системы к равновесному или близкому к нему состоянию. Это обеспечивает стабильность структуры и свойств, являющихся необходимым условием надежности и долговечности изделий, работающих в жестких температурно-силовых условиях.

Термически активируемые диффузионные процессы и фазовые превращения получают развитие в пределах зерна. Это обусловлено блокировкой наноразмерными включениями термодинамически стабильных фаз границ зерен и субзерен, являющихся препятствием (барьером) межкусталлитной диффузии, определяющим существен-

ную разницу в фазовом составе и строении соседних зерен и высокую термическую стабильность фаз, не имеющих когерентной связи с основой, в том числе и включений исходных компонентов.

Компактные материалы независимо от природы матричного металла, полученные по разработанной технологии, имеют микрокристаллический тип структуры основы с размером зерен $\leq 0,5$ мкм, разделенных на блоки $\leq 0,1$ мкм, с плотностью дислокаций, равной $10^9 \dots 10^{10}$ см⁻², концентрирующихся по границам зерен и субзерен, закрепленных термодинамически стабильными включениями оксидов размером менее 20 нм, карбидов, нитридов, интерметаллидов – не более 100 нм. Структурный и фазовый состав материалов отличается от равновесного наличием зерен и групп зерен основы с разной концентрацией легирующих компонентов в твердом растворе и отдельных включений исходных компонентов размером менее 0,1 мкм. Структура характеризуется высокой стойкостью против длительного термического воздействия при температурах, достигающих $0,85T_{пл}$ основы.

Установлено, что в качестве упрочняющих фаз в механически легированных никелевых сплавах эффективны наноразмерные частицы оксидов алюминия Al_2O_3 и хрома Cr_2O_3 , образующиеся в процессе реализации технологии в результате механически и термически активируемого взаимодействия между алюминием и хромом, с одной стороны, и оксидами молибдена MoO_3 и никеля – с другой. Первый оксид (MoO_3) вводился в исходную шихту в качестве поставщика кислорода, а вторые (оксиды никеля) во всех случаях находились в шихте как продукт взаимодействия никеля с кислородом, содержание которого в порошке никеля, являющегося основой композиций, составляло 0,2 %. Оптимизация состава исходной шихты, результаты которой приведены в [1–3], показала, что высоким комплексом механических

свойств обладают материалы, изготовленные из композиций, состоящих из порошков «Ni – 3 % Al», «Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO₃».

Целью работы являлась оптимизация процесса получения механически легированных гранулированных композиций на основе порошковых систем Ni–Al и Ni–Al–MoO₃ для производства высокопрочных наноструктурных дисперсно-упрочненных никелевых материалов.

Методика механического легирования, применяемое оборудование и приборы

В качестве исходных компонентов для изготовления сплавов служили стандартные порошки никеля ПНК-ОТ2 (ГОСТ 9722-79), алюминия ПА4 (ГОСТ 6058-73) и оксида молибдена (MoO₃, ч. д. а.). Исследование выполнено на двух материалах оптимального состава [3–6], получаемых из шихты, состоящей из порошков: Ni – 3 % Al; Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO₃. Параметрами оптимизации являлись механические свойства компактных материалов – пределы прочности при растяжении при 20, 800 и 1000 °С, а также относительное удлинение.

Реакционное механическое легирование осуществлялось в механореакторе на основе вибратора гирационного типа с четырьмя камерами объемом 1 дм³ каждая из стали 12Х18Н9Т с изолированным рабочим пространством. Рабочими телами служили шары диаметром 9,525 мм из стали ШХ15СГ твердостью HRC62. Радиус круговых колебаний составлял 5 мм. Круговая частота колебаний бесступенчато регулировалась в пределах 22...29 с⁻¹, что приводило к изменению ускорения рабочих тел от 100 до 160 м·с⁻². Степень заполнения рабочей камеры шарами составляла 80 %.

Гранулированная композиция, полученная реакционным механическим легированием, подвергалась холодному

брикетированию в стальной пресс-форме методом двухстороннего прессования до плотности 70...75 % от теоретической. Брикет, обладающие достаточной прочностью и неразрушающиеся при переработке, получались прессованием композиции, насыпанной в контейнер из технического железа с толщиной стенки 0,2...0,3 мм.

Отжиг брикетов осуществлялся в аргоне. Термическая обработка брикетов из механически легированной композиции первого состава проводилась при 900 °С, второго – при 1000 °С. Продолжительность отжига составляла 4 ч.

Полуфабрикаты получались горячей экструзией спеченных брикетов, нагретых до 1100 °С. Коэффициент вытяжки при экструзии равнялся 20. Температура нагрева матрицы ограничивалась теплостойкостью материала пресс-формы и составляла 600 °С. Детали пресс-формы для экструзии – матрица, фильера, пуансон изготавливались из стали 3Х2В8Ф и подвергались термической обработке, заключающейся в закалке с температуры 1100 °С и отпуске при 650 °С. Скорость истечения материала составляла 0,15 м·с⁻¹. Продуктом экструзии являлся прутки диаметром 12 мм.

Определение механических свойств проводилось на машине «INSTRON» на пропорциональных цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 4,0 и 5,0 мм с начальной расчетной длиной 20 и 25 мм соответственно.

Оптимизация процесса механического легирования осуществлялась в два этапа. На первом – с целью определения граничных значений факторов, являющихся необходимыми данными для оптимизации технологии, методом однофакторного эксперимента исследовано влияние условий обработки на механические свойства материалов; на втором – с использованием математического планирования экспериментов (метод Бокса-Уилсона) найдена и описана область оптимума.

Результаты исследования и их обсуждение

Обработка вышеприведенных порошковых композиций обеспечивает формирование материалов, основа которых состоит из зерен размером $\leq 0,5$ мкм, разделенных на блоки величиной $\leq 0,1$ мкм, с границами, стабилизированными образовавшимися в процессе реализации технологии наноразмерными включениями оксидов и интерметал-

лидов. В материалах, получаемых из шихты, содержащей оксид молибдена MoO_3 , основной упрочняющей фазой является оксид алюминия Al_2O_3 . При отсутствии в исходной порошковой смеси MoO_3 упрочнение обусловлено, прежде всего, наличием алюминидов Ni_3Al [3–6]. Влияние основных факторов обработки шихты в механореакторе на механические свойства материалов приведено на рис. 1.

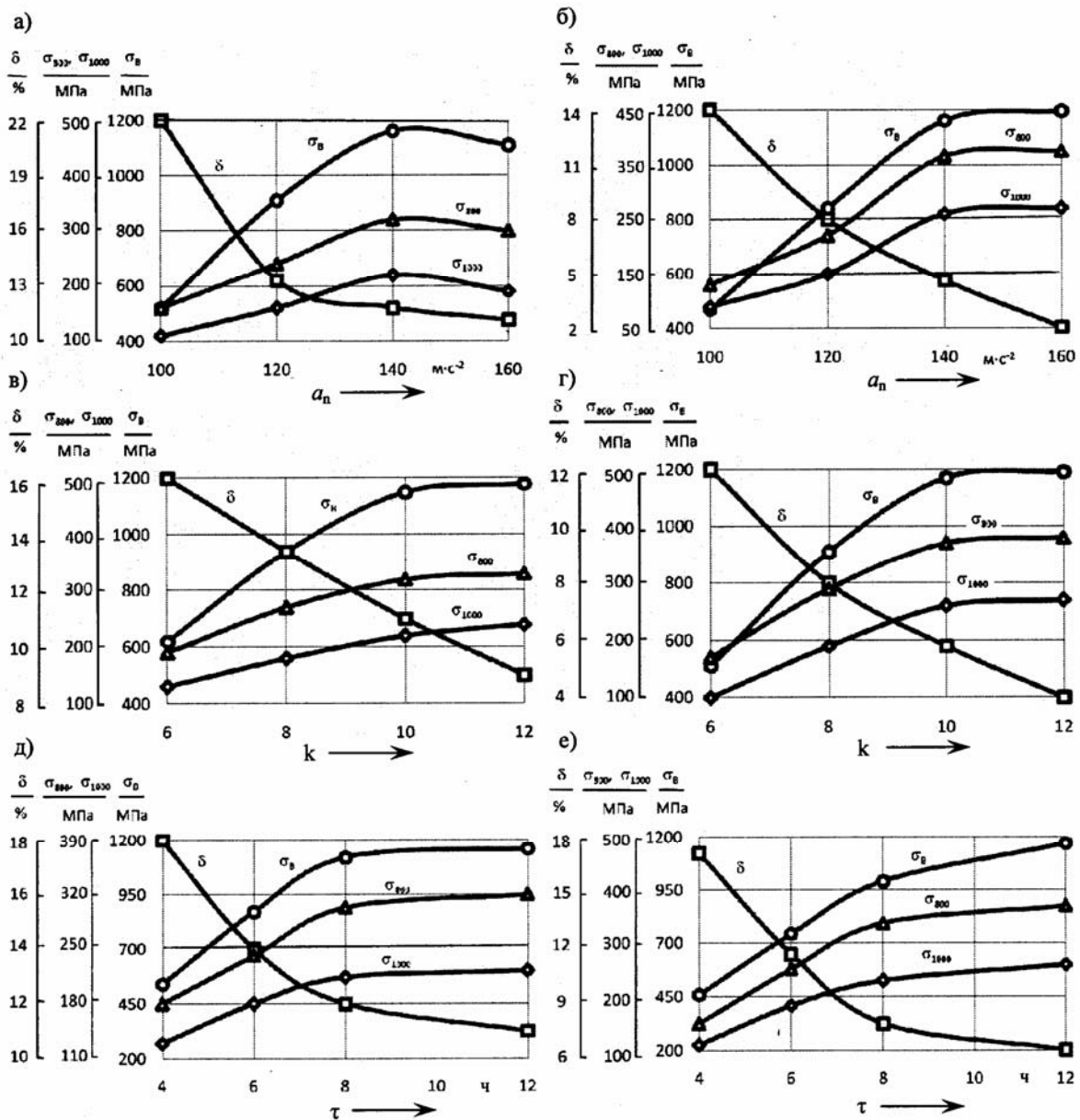


Рис. 1. Влияние условий механического легирования на свойства материалов: а, в, д – Ni – 3 % Al; б, г, е – Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO_3

При исследовании влияния на свойства материалов одного из факторов другие имели постоянное значение, находящееся в области оптимума. При этом как для одного, так и для другого материала ускорение рабочих тел равнялось $140 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, а отношение объемов рабочих тел и шихты – 10. Продолжительность обработки в механореакторе шихты Ni – 3 % Al составляла 8 ч; Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO_3 – 12 ч.

Кинетика и полнота протекания механически активируемых превращений, определяющих свойства материалов, зависят от энергонапряженности режима механического легирования, под которой понимается мощность, затрачиваемая на единицу массы обрабатываемой шихты, а также продолжительности обработки. Для ряда систем в определенном интервале значений энергонапряженности режима обработки, превышающих пороговое, установлена прямо пропорциональная зависимость между этим фактором и скоростью механохимических превращений [7]. Факторами, влияющими на энергонапряженность механореактора вибрационного типа, являются амплитуда и частота колебаний помольной камеры, определяющие нормальное ускорение размазывающих тел, отношение объемов рабочих тел и обрабатываемой шихты и степень заполнения помольной камеры рабочими телами.

Мощность, потребляемая вибрационным механореактором [8], находится из выражения

$$N = aM_c\omega^3r,$$

где a – величина, характеризующая положение центра тяжести размазывающей нагрузки; M_c – полная масса шаровой загрузки; ω – частота круговых колебаний; r – радиус колебаний.

Рассчитанная по уравнению $a_n = (2\pi\omega)^2r$ частота колебаний, необходимая для достижения заданного ускорения рабочих тел, находящегося в интервале $100\ldots160 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, при котором получают развитие механохимические

превращения, при радиусе круговых колебаний, равном 5 мм, изменяется в пределах $22\ldots29 \text{ с}^{-1}$.

При оптимальной степени заполнения помольной камеры рабочими телами, обеспечивающей максимальное значение ударного нагружения и его частоту и не зависящей от состава обрабатываемых композиций, равной 80 % от ее объема, с увеличением ускорения рабочих тел со 100 до 160 с^{-2} значение ударного воздействия на 1 мм поверхности помольной камеры изменяется в пределах 6...12 МПа – по зависимости, близкой к линейной. Влияние данного фактора на частоту нагружения описывается кривой с максимумом. Наибольшая величина этого параметра, равная $5\ldots6 \text{ с}^{-1}$, наблюдается при ускорении $140\ldots160 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$.

Анализ результатов по исследованию влияния условий обработки шихты в механореакторе на свойства (см. рис. 1) позволяет сделать вывод, что значения факторов, обеспечивающих получение материалов, однозначно превосходящих по прочности аналоги, могут изменяться в пределах: ускорение рабочих тел – $130\ldots150 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, отношение объемов рабочих тел и шихты – 8...12, продолжительность обработки – 6...12 ч. Причем для достижения максимальной прочности материала (Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO_3), упрочненного синтезирующимся в процессе реализации технологии оксидом алюминия, по сравнению с материалом (Ni – 3 % Al), упрочненного алюминидом никеля, энергонапряженность режима обработки или ее продолжительность должны быть больше.

Полученные данные явились основой для установления граничных значений ускорения рабочих тел и отношения объемов рабочих тел и шихты при механическом легировании для описания области оптимума. При этом продолжительность обработки шихт состава Ni – 3 % Al и Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO_3 составляла 8 и 12 ч соответственно. Матрица планирования и результаты

эксперимента представлены в табл. 1. Средние значения параметров оптимизации – пределы прочности при 20 °С ($\bar{y}_1$) и 1000 °С ($\bar{y}_2$), приведенные в матрице планирования, получены по результатам двух параллельных опытов.

В результате статистической обработки экспериментальных данных (табл. 2 и 3) получены математические модели, адекватно представляющие эксперимент.

Табл. 1. Матрица планирования и результаты эксперимента при описании области оптимума

Характеристика	Фиктивная переменная	Фактор					Материал			
		основной		производный			Ni – 3 % Al		Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO ₃	
		a ₁₀ , м·с ⁻²	k							
Основной уровень Интервал варьирования (I) Верхний уровень Нижний уровень		140	10				Параметры оптимизации			
		20	2				σ_B , МПа	σ^{1000} , МПа	σ_B , МПа	σ^{1000} , МПа
		160	12							
		120	8							
Код	x ₀	x ₁	x ₂	x ₁ x ₂	x ₁ ¹ =x ₁ ² -2/3	x ₂ ¹ =x ₂ ² -2/3	$\bar{y}_1^1$	$\bar{y}_1^2$	$\bar{y}_2^1$	$\bar{y}_2^2$
Опыты										
1	+1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3	590	100	530	110
2	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3	880	190	880	200
3	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	1070	200	1130	250
4	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	850	170	850	220
5	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3	1110	190	1190	270
6	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3	910	160	840	170
7	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3	1170	240	1190	270
8	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3	940	180	910	190
9	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	1160	220	1170	260

Для материала состава Ni – 3 % Al:

– предел прочности при растяжении (σ_B , МПа)

$$y_1^1 = 1186 + 109x_1 + 124x_2 - 26x_1x_2 - 188x_1^2 - 143x_2^2; \quad (1)$$

– предел прочности при растяжении при 1000 °С (σ_B^{1000} , МПа)

$$y_2^1 = 220 + 19x_1 + 30x_2 - 15x_1x_2 - 45x_1^2 - 11x_2^2. \quad (2)$$

Для материала состава Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO₃:

– предел прочности при растяжении (σ_B , МПа)

$$y_1^2 = 1192 + 150x_1 + 152x_2 - 20x_1x_2 - 190x_1^2 - 152x_2^2; \quad (3)$$

– предел прочности при растяжении при 1000 °С (σ_B^{1000} , МПа)

$$y_2^2 = 259 + 43x_1 + 33x_2 - 15x_1x_2 - 37x_1^2 - 27x_2^2. \quad (4)$$

Графическая интерпретация математических моделей представлена на рис. 2 и 3.

Анализ результатов математического моделирования показывает, что оптимальные значения основных факторов механического легирования, обеспечивающих максимальную прочность материалов (σ_B и σ_B^{1000}), полученных из шихт составов Ni – 3 % Al и Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO₃, подвергнутых обработке в механореакторе в течение 8 и 12 ч соответственно, близки. Величина ускорения рабочих тел находится в пределах 140...150 м·с⁻². Отношение объемов рабочих тел и шихты составляет 10...12. При этом материалы, полученные из шихты по оптимальному режиму, по прочности не менее чем в 1,5 раза превосходят аналоги, но уступают последним по пластично-

сти. Относительное удлинение у материала, упрочненного интерметаллидом

(Ni_3Al), превышает 10 %, а оксидом (Al_2O_3) – 5 %.

Табл. 2. Результаты статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума (материал – Ni – 3 % Al)

Параметры	Фактор							
	b_0'	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}	Δb_0
σ_B , МПа	965	1186	109	124	-26	-188	-143	± 30
σ^{1000} , МПа	183	220	19	30	-15	-45	-11	± 10

Продолжение табл. 2

Параметры	Фактор								
	Δb_i	Δb_{ij}	Δb_{ii}	S_y^2	$S_{ад}^2$	f_1	f_2	$F_{0,05}^{расч}$	$F_{0,05}^{табл}$
σ_B , МПа	± 14	± 16	± 23	423	800	9	3	1,9	3,9
σ^{1000} , МПа	$\pm 4,5$	$\pm 5,4$	± 10	45	24	9	3	0,53	8,9

Табл. 3. Результаты статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума (материал – Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO_3)

Параметры	Фактор							
	b_0'	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}	Δb_0
σ_B , МПа	964	1192	150	152	-20	-190	-152	± 34
σ^{1000} , МПа	216	259	43	33	-15	-37	-27	± 12

Продолжение табл. 3

Параметры	Фактор								
	Δb_i	Δb_{ij}	Δb_{ii}	S_y^2	$S_{ад}^2$	f_1	f_2	$F_{0,05}^{расч}$	$F_{0,05}^{табл}$
σ_B , МПа	± 16	± 19	± 27	566	1187	9	3	2,1	3,9
σ^{1000} , МПа	$\pm 5,9$	$\pm 7,1$	± 10	79	190	9	3	2,4	3,9

Заключение

Проведенное исследование позволило установить оптимальные условия обработки шихты в механореакторе, обеспечивающие получение высокопрочных наноструктурных дисперсно-упрочненных никелевых материалов. Значения основных факторов механического легирования равны: ускорение рабочих тел – $140...150 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, отношение объемов рабочих тел и шихты – $10...12$, степень помольной камеры ра-

бочими телами – 80 %, продолжительность обработки – $8...12$ ч. Материалы, изготовленные из шихты, подвергнутой обработке в механореакторе по оптимальному режиму, по прочности не менее чем в 1,5 раза превосходят аналоги, но уступают последним по пластичности. Относительное удлинение у материала, упрочненного интерметаллидом (Ni_3Al), превышает 10 %, а оксидом (Al_2O_3) – 5 %.

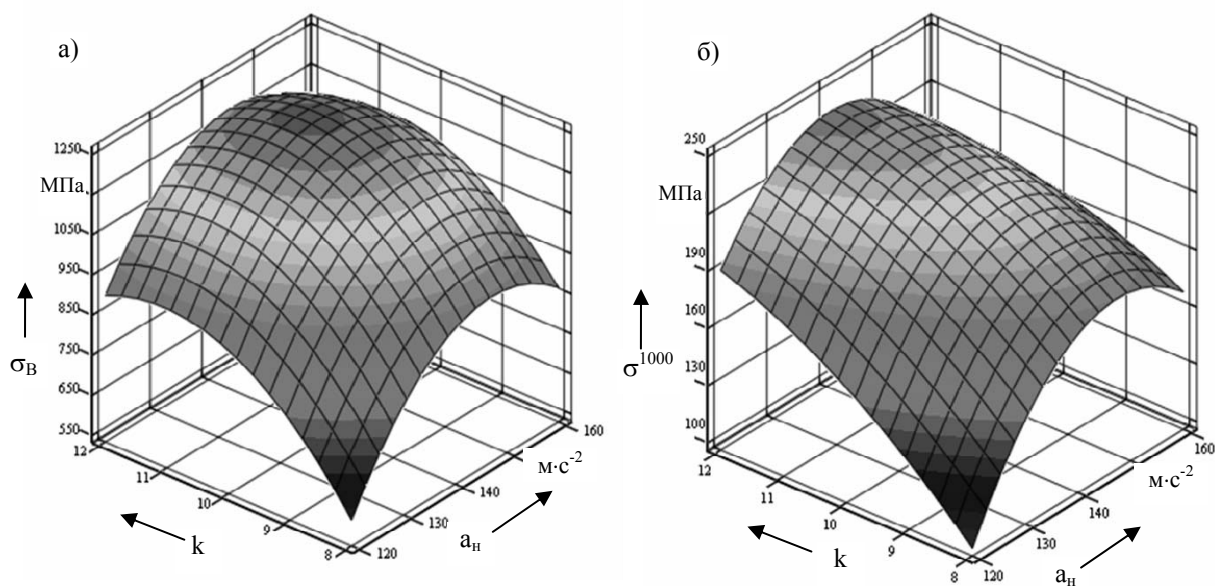


Рис. 2. Зависимость предела прочности при растяжении при 20 °С (а) и при 1000 °С (б) материала состава Ni – 3 % Al от ускорения рабочих тел и отношения объемов рабочих тел и шихты

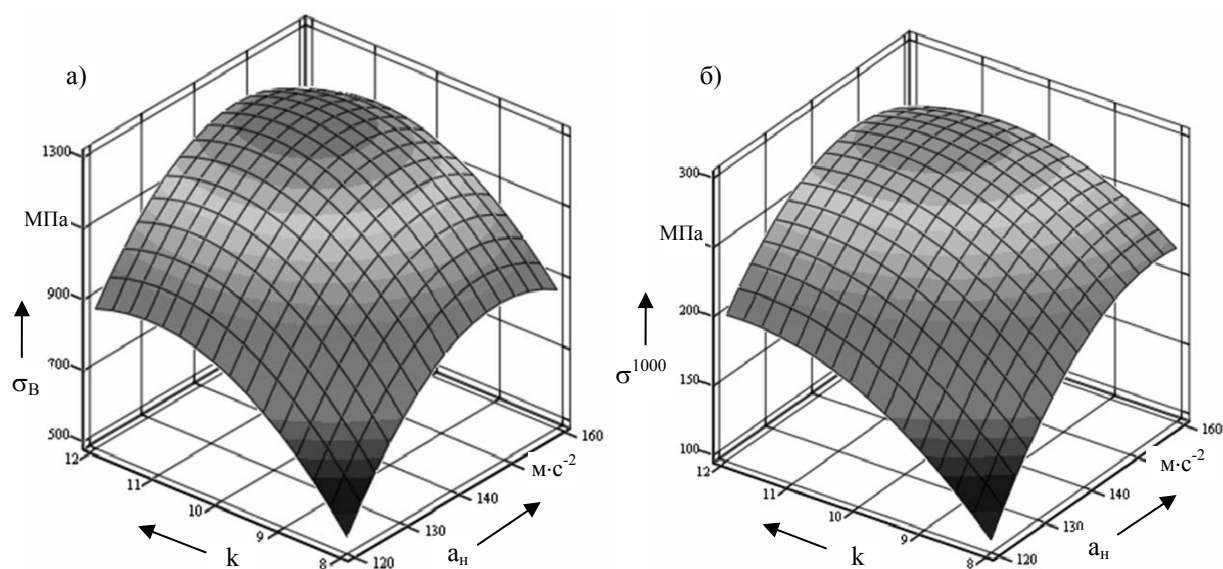


Рис. 3. Зависимость предела прочности при растяжении при 20 °С (а) и при 1000 °С (б) материала состава Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO₃ от ускорения рабочих тел и отношения объемов рабочих тел и шихты

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Витязь, П. А.** Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск : Беларуская навука, 1998. – 352 с.
2. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе

металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 264 с.

3. **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.

4. **Ловшенко, Ф. Г.** Получение, структура и свойства механически легированных наноструктурных никелевых материалов / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 1. – С. 10–17.

5. **Ловшенко, Ф. Г.** Закономерности формирования фазового состава и структуры механически легированных никелевых композиций / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 4. – С. 96–106.

6. **Ловшенко, Ф. Г.** Оптимизация состава механически легированных дисперсно-упрочненных никелевых материалов / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 3. – С. 110–120.

7. **Хайнике, Г.** Трибохимия : пер. с англ. / Г. Хайнике. – М. : Мир, 1987. – 584 с.

8. **Rose, H. E.** Vibration mills and vibration milling / H. E. Rose, R. M. S. Sullivan. – L., 1961. – 302 p.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 29.12.2009

G. F. Lovshenko, F. G. Lovshenko, Z. M. Lovshenko
Optimization of the process of mechanical alloy
at the reception of age-hardened nanostructural
mechanically alloyed nickel materials

The influence of conditions of mechanical alloy on the properties of age-hardened nanostructural mechanically alloyed nickel materials with intermetallids and oxide hardening has been studied and the optimization of the process has been carried out.

УДК 676:621.9.042

В. А. Логвин, канд. техн. наук, А. А. Жолобов, канд. техн. наук, проф.**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НБВС ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЧАШЕЧНЫМИ РЕЗЦАМИ С НЕПРЕРЫВНО ОБНОВЛЯЮЩЕЙСЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ**

В статье предложен порядок построения модели НБВС, позволяющей определить величину и расположение сечения с максимальным статическим прогибом при обработке чашечными резцами с непрерывно обновляющейся кромкой. Проанализировано влияние величины прогиба вала на точность и виброустойчивость обработки НБВС. Приведены результаты расчетов величин прогиба вала от действия массы и усилия резания, определены собственные частоты и формы колебаний для обеспечения виброустойчивости и достижения заданной точности при обработке.

В целлюлозно-бумажной промышленности при производстве бумаги с высокими печатными свойствами применяют различные отделочные операции, в частности, каландрирование на суперкаландре. Данный процесс позволяет повысить удельную массу бумаги, плотность, лоск, прозрачность, усилие на разрыв, выровнять толщину бумажного полотна, уменьшить шероховатость (гладкость) [1, 2].

Увлажненная бумага в суперкаландре подвергается действию давления и трения между металлическими и упругими набивными бумажными валами суперкаландров (НБВС). Конструктивно НБВС представляет собой стальной сердечник, на котором под определенным давлением спрессована набивка. Набивка на сердечнике запирается торцевыми шайбами и специальной арматурой. Наружный диаметр НБВС зависит от ширины формата суперкаландра и составляет 340...760 мм с диаметром сердечника в пределах 180...470 мм. Длина набивной части вала должна быть на 100...150 мм больше обрезной ширины каландрируемой бумаги. Суперкаландры с рабочей шириной менее 4250 мм имеют запорные устройства, представляющие собой кольца с разъемными сегментами, а широкоформатные суперкаландры с рабочей шириной 4250...8620 мм – запорные гайки с конической опорной поверхностью, на ко-

торую базируются торцовые шайбы. Сердечники, как и запорную арматуру НБВС, изготавливают из стали 45, 40Х или 45Х.

НБВС набираются на гидравлических прессах, обеспечивающих давление в набивке от 9 до 45 МПа и более, по определенной технологии набивки и обрабатываются на токарных и шлифовальных станках. Величина усилия, с которым набирается НБВС, выбирается в зависимости от назначения вала и необходимой плотности и твердости. После механической обработки валы проходят операцию обкатки на суперкаландре без бумаги по определенному режиму для снижения шероховатости рабочей поверхности и повышения поверхностной твердости. НБВС, особенно вновь изготовленные, после первой механической обработки еще не обладают достаточной твердостью поверхности, поэтому очень чувствительны к механическим воздействиям вследствие попадания между валами разного рода пыли, бумажных и других посторонних включений. Поэтому обкатка должна производиться по чистым отполированным поверхностям металлических валов, по всей длине бочки вала при равномерном линейном давлении между валами и равномерной их температуре, не превышающей 50...60 °С. Поскольку контролировать непосредственно давление на поверхности НБВС невозмож-

но, то контроль осуществляется по усилию прижима металлических валов к НБВС, отнесенному к рабочей длине валов суперкаландра. Это связано с тем, что с ростом усилия прижима увеличивается площадь площадки контакта НБВС и металлического вала и соответственно удельное давление уменьшается (рис. 1). Нормальная твердость НБВС после механической обработки для каландрирования писчей бумаги и бумаги для печати достигает 36...40 ед. по шкале С склероскопа Шора. При этом валы должны выдерживать линейное давление при каландрировании не менее 100...250 кН/м, а на современных суперкаландрах – до 350 кН/м. Для отделки технической бумаги используют НБВС из асбестовой бумаги, содержащей до 25...50 % хлопковой полумассы

с латексной или крахмальной проклейкой. Твердость набивки таких валов достигает 42...46 ед. Новые валы, установленные на суперкаландр после шлифования, подвергают длительной обкатке в течение 6...12 ч вхолостую, обмывая их через каждые 15...30 мин теплой водой, доводя тем самым поверхностную твердость вала до 50...52 ед. Новые валы обкатывают дольше, чем валы, подвергаемые повторной механической обработке. Готовые НБВС должны отвечать жестким техническим требованиям. Овальность бочки вала должна быть не более 0,02 мм, отклонение профиля продольного сечения бочки вала (конусность, бочкообразность, изогнутость) – не более 0,02 мм по всей рабочей поверхности, а шероховатость – не более 0,8...1,6 мкм по параметру Ra [1, 2].

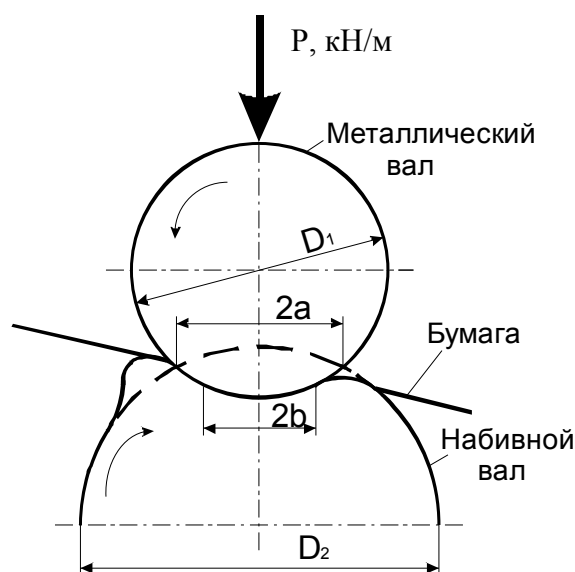


Рис. 1. Графическое отображение образования площадки деформации набивного бумажного вала на суперкаландре: 2a – геометрическое перекрытие одного вала другим, мм; a – геометрическая деформация НБВС, мм; 2b – ширина зоны давления, мм, при действии равномерно распределенного по ширине усилия P, кН/м

Трение бумаги о поверхность валов в процессе каландрирования происходит главным образом из-за радиальной деформации НБВС, в которые вдавливаются более твердые металлические валы. Благодаря этому окружные скорости НБВС и металлических валов раз-

ные, и бумага испытывает значительное трение в зоне прессования, что приводит к росту температуры до 63...68 °С [1, 2]. Увеличение температуры валов выше 70 °С приводит к ухудшению качества выпускаемой бумаги и возможности обрыва полотна в процессе ка-

ландрирования, особенно при недостаточном количестве влаги в бумаге. Наибольшее влияние на величину проскальзывания валов суперкаландров оказывают давление, скорость и упругие свойства НБВС [1]. На рис. 1 видно, что с повышением усилия воздействия металлического вала на поверхности НБВС увеличивается площадка деформации, в результате чего возрастает длительность пребывания бумаги под воздействием микроскольжения металлического вала по НБВС [2].

НБВС в силу своих конструктивных особенностей отличаются низкой жесткостью и соответственно низкими силами упругого сопротивления. Поэтому упругая система НБВС легко приходит в колебательное движение при выводе каким-либо путем из равновесия. Колебания происходят около положения упругого равновесия, при котором в нагруженной системе имеют место статические деформации и соответствующие им статические напряжения. При колебаниях к статическим деформациям добавляются динамические, зависящие от вида колебательного движения и амплитуды [3].

В связи с вышеизложенным обеспечение технических требований, предъявляемых к НБВС в результате механической обработки, является сложнейшей задачей. Ввиду низкой жесткости НБВС обработка данных изделий возможна с частотами вращения, значительно отличающимися от собственной частоты во избежание появления резонанса. При этом следует учитывать наличие прогиба у НБВС при установке на станке в статическом состоянии как фактора, снижающего устойчивость. Как показала практика эксплуатации и наши измерения, величина прогиба составляет от 1,5 – при формате 4410 мм до 4 мм – при формате 8620 мм. Наличие постоянно действующего растягивающего усилия от давления набивочного материала на запорную арматуру поддерживает стальной сердечник

НБВС в напряженном растянутом состоянии. Действие постоянных растягивающих напряжений в сердечнике НБВС при приложении крутящего момента способствует незначительному уменьшению прогиба во время вращения. Но, тем не менее, уменьшить прогиб НБВС при вращении до нуля не удастся и обработку приходится производить с динамическим прогибом в вертикальной плоскости, отличным от статического. Также сила резания, прикладываемая к НБВС при обработке, стремится отклонить его от состояния равновесия. Если силы инерции и растягивающие усилие в сердечнике, стремящиеся уменьшить прогиб НБВС, приближая положение оси вала к оси центров станка при вращении, будут превышены составляющими усилия резания по одной из осей, произойдет смещение центра масс НБВС и виброустойчивость снизится. Все эти факторы в значительной мере определяют стабильность состояния НБВС при обработке. Поэтому нами принято решение по разработке математической модели НБВС, позволяющей определять величину статического прогиба, критические собственные частоты, соответствующие им формы колебаний в зависимости от конструктивных параметров вала, а также выявить влияние составляющих усилия резания на перемещение НБВС.

Применительно к расчету виброустойчивости системы НБВС нами использован программный продукт, построенный по модульному принципу как автономная система анализа МКЭ. Она включает модули для решения линейных и нелинейных, статических и динамических задач анализа механических конструкций, а также анализ собственных частот и форм колебаний [4–7].

Построение компьютерной конечно-элементной модели НБВС производилось вводом данных геометрии деталей, заданием физико-механических свойств материалов деталей НБВС, гра-

ничных условий, разбиением конструкции НБВС на конечные элементы для решения статической и частотной задач. На рис. 2 представлена компьютерная схема НБВС диаметром 720 мм формата 8620 мм с граничными условиями,

внешними нагрузками и видом сетки конечных элементов на твердом теле. Модель построена из твердых тетраэдральных 4-узловых конечных элементов. Густота сетки разбиения равномерная по сечению.

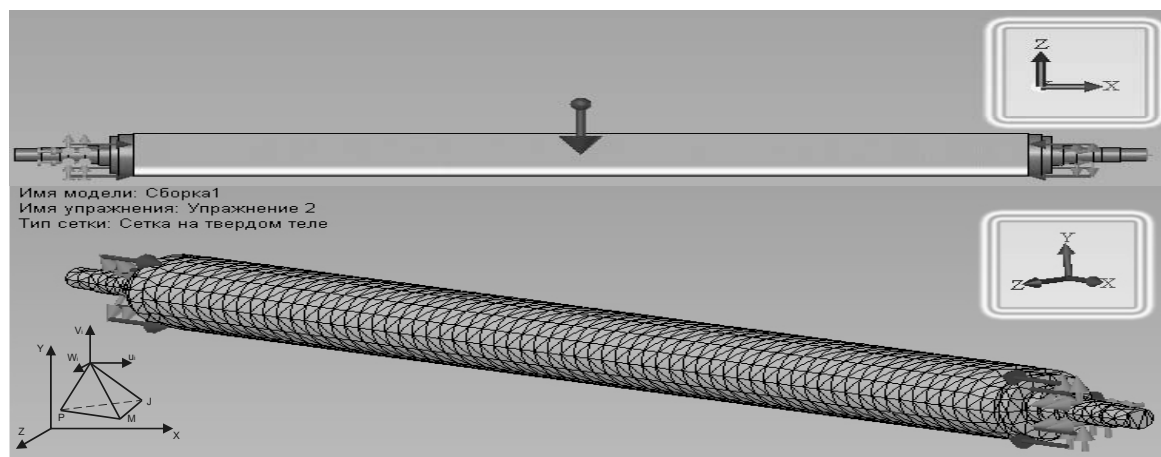


Рис. 2. Компьютерная схема НБВС

Адекватность модели для статического расчета НБВС оценивали, сопоставляя с результатами экспериментальных исследований, проводимых на Светогорском ЦБК, расположенном в Ленинградской области, целью которых было измерение прогиба обрабатываемого вала в статическом состоянии. Прогиб НБВС с рабочим диаметром набивки 720 мм и шириной формата 8620 мм равнялся 3,1 мм. В результате проведенных расчетов конечно-элементной модели исследуемого вала результирующее перемещение под действием массы равно 3,45 мм (рис. 3). Результаты статистической обработки данных показали, что погрешность расчетных значений перемещений НБВС при статическом расчете составляет 9,9...11 %. Разработанная модель с достаточной степенью точности позволяет прогнозировать величину статического прогиба НБВС, величина которого затем учитывается при назначении величин установок чашечного резца с непрерывно обновляющейся кромкой относительно

НБВС для получения размера статической настройки технологической системы перед обработкой. Следует отметить, что наличие возможности изменять скорость обновления режущей кромки во время обработки в соответствии с законом изменения величины прогиба НБВС и в соответствии со скоростью формирования площадок износа на рабочих поверхностях режущего клина, а также радиуса перехода между передней и задней поверхностями чашечного резца на протяжении рабочего хода позволяет компенсировать влияние прогиба вала на точность обработки.

На рис. 4 представлены результаты расчетов конечно-элементной модели НБВС по определению величины критических собственных частот и соответствующих им форм колебаний.

Анализируя результаты компьютерных исследований конечно-элементной модели НБВС, установлено, что для исследуемого вала наиболее критическими являются первая и вторая формы колебаний, т. к. обеспечивают наибольший раз-

мах колебаний (см. рис. 4, а, б) при собственной частоте 16,1 Гц, что соответствует колебаниям в горизонтальной (ось Y) и

вертикальной (ось Z) плоскостях, и соответственно наибольшее искривление вала во время обработки.

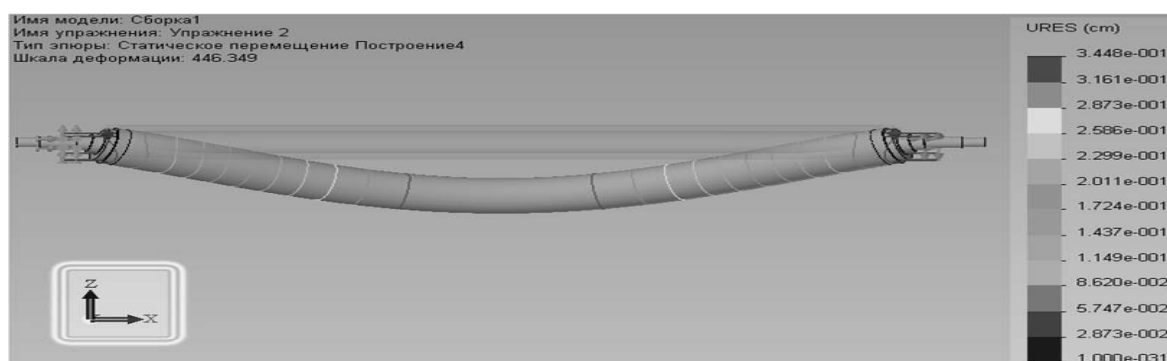


Рис. 3. Изменение величины статического перемещения НБВС в пределах длины обработки



Рис. 4. Формы продольных и поперечных колебаний конечно-элементной модели НБВС формата 8620 мм

Колебания НБВС по эти осям приводят к наибольшим отклонениям диаметральных размеров обрабатываемого вала в продольном сечении при обработке, что может привести к отклонению действительных размеров за пределы поля допуска. Менее критическими являются третья, четвертая и пятая формы колебаний, так как они происходят при собственной частоте 47,1; 47,2 и 55,9 Гц (см. рис. 4, в–д), что соответствует 2830 мин^{-1} и более частоты вращения шпинделя, и обеспечивают наименьший размах колебаний в горизонтальной и вертикальной плоскостях или наименьший прогиб вала при обработке в этих плоскостях. Следует отме-

тить, что обработка НБВС с такими частотами вращения не производится и возникновение таких форм колебаний при обработке НБВС исключено.

На рис. 5 представлены изменения перемещений НБВС в пределах длины обработки при критичной собственной частоте в 16,1 Гц. При этом перемещения в сечении с максимальным статическим прогибом составляют $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, что является существенным фактором, влияющим на точность обработки НБВС, если допустить совпадение вынужденной частоты вращения вала с собственной в 16,1 Гц, и даже поставит под угрозу возможность осуществления процесса обработки.

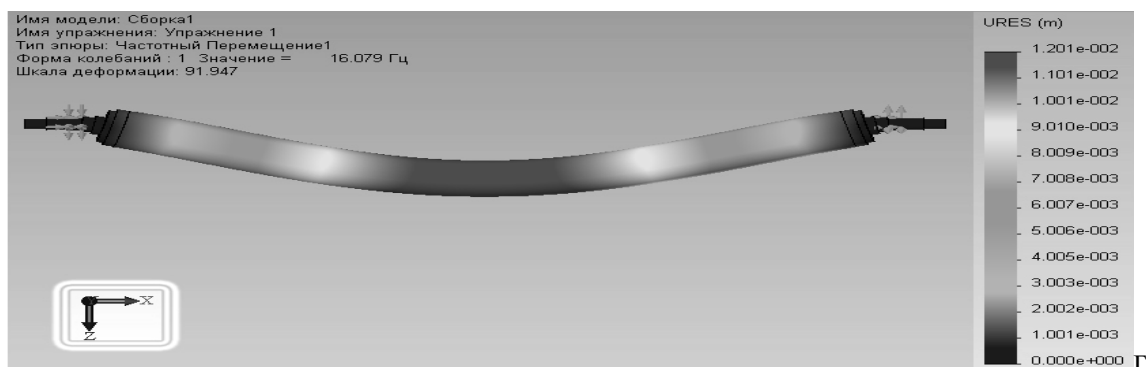


Рис. 5. Результаты расчетов перемещений конечно-элементной модели НБВС формата 8620 мм при критичной частоте 16,1 Гц

На Светогорском ЦБК проведены экспериментальные исследования по определению размаха колебаний НБВС в сечении с наибольшим статическим прогибом. Измерение размаха колебаний в горизонтальной и вертикальной плоскостях осуществлялось при помощи двух индикаторов с ценой деления 0,01 мм, при этом величина его составила в вертикальной плоскости 0,12 мм, а в горизонтальной плоскости – 0,18 мм. При измерении размаха колебаний угловая частота вала составляла 16,7 рад/с, что соответствует 160 мин^{-1} или 2,7 Гц. При этом вынужденная частота вращения НБВС почти в 6 раз отличалась от собственной, что исключает возможность

возникновения резонанса. Компьютерные и экспериментальные исследования подтверждают, что механическая обработка тяжеловесных и длинномерных НБВС сопряжена с определенными трудностями, вызванными отклонением их от положения равновесия на половине длины обработки более чем на 1,2 мм под действием массы при вращении с критической частотой (см. рис. 5).

Для определения степени влияния силы резания на точность обработки и обеспечение виброустойчивости технологической системы при обработке НБВС усилие резания было представлено тремя составляющими в наиболее опасном сечении, где в статике имеется наибольший

прогиб, находящийся, как правило, в области середины рабочего хода.

На рис. 6, а представлены изменения перемещений НБВС по оси X от действия составляющих силы резания; в опасном сечении по середине рабочего

хода перемещение составляет 0,17 мм. На рис. 6, б представлены изменения перемещений НБВС по оси Y от действия составляющих силы резания; в опасном сечении при этом максимальное перемещение составляет 0,065 мм.

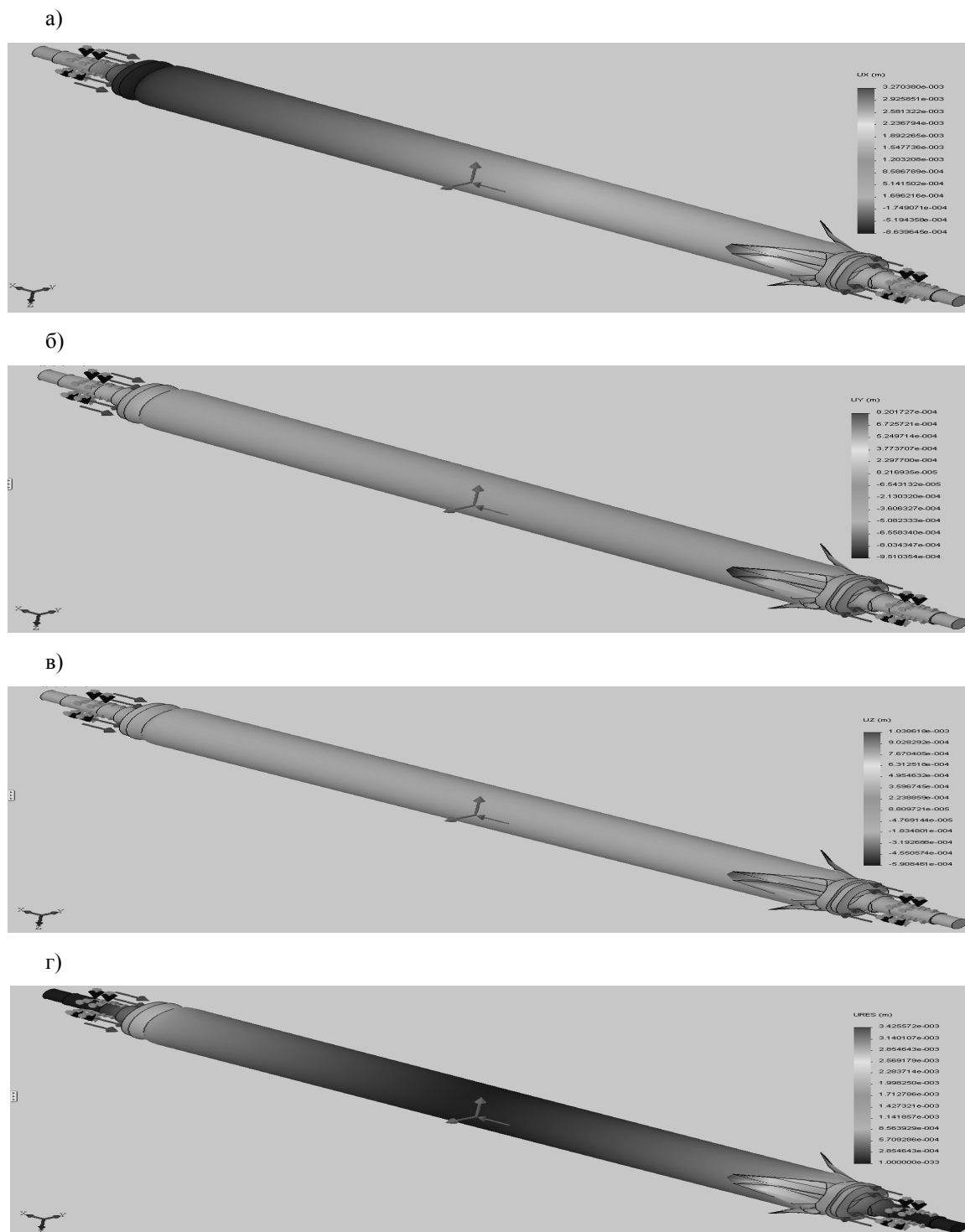


Рис. 6. Результаты изменений перемещений конечно-элементной модели НБВС формата 8620 мм от действия составляющих силы резания

На рис. 6, в представлены изменения перемещений НБВС по оси Z от действия составляющих силы резания; величина максимального перемещения составляет 0,22 мм. На рис. 6, г представлены изменения результирующих перемещений НБВС от действия составляющих силы резания; величина максимального перемещения по середине длины обработки составляет 0,29 мм. Анализируя результаты расчетов от действия составляющих силы резания на перемещения обрабатываемого вала в опасном сечении, находящегося, как правило, в сечении с максимальным статиче-

ским прогибом, можно сделать следующие выводы: действие силы резания существенно влияет на отклонение обрабатываемого вала от положения равновесия, что приводит к искажению формы вала в продольном сечении, и при этом значительно снижается виброустойчивость технологической системы в процессе обработки.

На рис. 7 представлены результаты изменений результирующих перемещений от совместного действия массы вала и результирующей силы резания; максимальное перемещение составляет 1,73 мм.

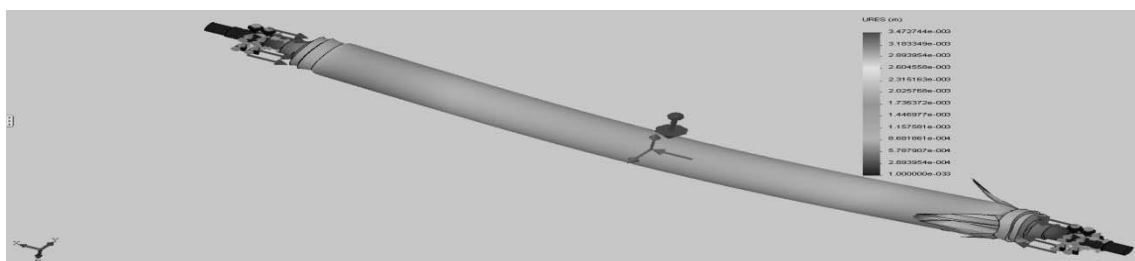


Рис. 7. Результаты изменений результирующих перемещений конечно-элементной модели НБВС формата 8620 мм от совместного действия массы вала и результирующей силы резания

По аналогии с НБВС формата 8620 мм построена конечно-элементная модель вала диаметром 590 мм формата 4410 мм с граничными условиями, внешними нагрузками и равномерным разбиением сетки конечных элементов на твердом теле по сечению.

Адекватность модели расчета прогиба НБВС оценивали, сопоставляя с результатами экспериментальных исследований, проводимых на ООО «ИлимСеверРМП» (г. Коряжма), при которых был измерен прогиб НБВС в статическом состоянии. Прогиб вала с рабочим диаметром набивки 590 мм и шириной формата 4410 мм в результате измерений составил 1,35 мм. В результате проведенных компьютерных исследований конечно-элементной модели результирующее статическое перемещение под действием массы исследуемого вала составило 1,27 мм (рис. 8, а). Результаты

статистической обработки данных показали, что погрешность расчетных значений перемещений НБВС составляет 5,9...6,3 %. Разработанная модель с достаточной степенью точности позволяет прогнозировать величину статического прогиба НБВС, учитываемую при статической настройке технологической системы.

На рис. 8, б представлены изменения перемещений конечно-элементной модели НБВС вдоль длины обработки при критичной собственной частоте в 38,7 Гц. На ООО «ИлимСеверРМП» экспериментально определен размах колебаний НБВС в сечении с наибольшим статическим прогибом. Измерение в горизонтальной и вертикальной плоскостях осуществлялось при помощи двух индикаторов с ценой деления 0,01 мм, при этом величина его составила в вертикальной плоскости 0,05 мм, а в гори-

зонтальной плоскости – 0,09 мм. При измерении размаха колебаний угловая частота составляла 16,7 рад/с, что соответствует 2,7 Гц. Обработка НБВС с данной частотой вращения обеспечивает

большую виброустойчивость процесса обработки, чем при обработке вала с форматом 8620 мм, т. к. значительно отличается от собственной частоты вала.

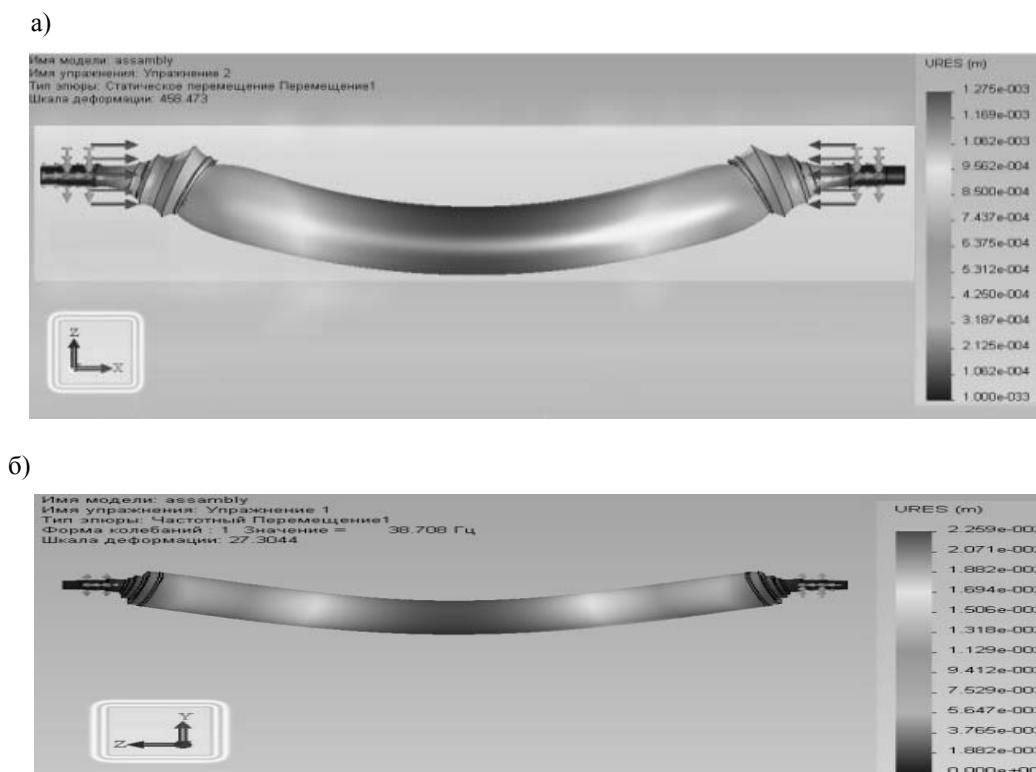


Рис. 8. Результаты изменений перемещений НБВС формата 4410 мм вдоль длины обработки

Оценивая результаты компьютерных исследований конечно-элементной модели НБВС, выявлено, что для исследуемого вала критическими также являются первая и вторая формы колебаний, так как обеспечивают наибольший размах колебаний при собственной частоте 38,7 и 38,8 Гц, что соответствует колебаниям в горизонтальной (ось Y) и вертикальной (ось Z) плоскостях и приводят к максимальным искривлениям вала при обработке. Менее критическими также являются третья, четвертая и пятая формы колебаний, т. к. они происходят при собственной частоте 65,7; 66,4 и 88,1 Гц, что соответствует частоте вращения шпинделя 3941,5 мин⁻¹ и более, и обеспечивают наименьший размах колебаний в горизонтальной и

вертикальной плоскостях и соответственно наименьшие искривления вала в опасном сечении, имеющем максимальный статический и динамический прогибы при обработке.

При обработке размах колебаний возрастает за счет приложения усилия резания, отклоняющего вал от положения равновесия при свободном вращении, особенно при приближении режущего инструмента к сечению с максимальным статическим прогибом в области середины рабочего хода. Если же величина усилия резания превысит величину сил упругого сопротивления вала и отклонит его от положения относительного равновесия, то размах колебаний возрастет в десятки раз и процесс обработки необходимо будет прервать.

Следует также учитывать то обстоятельство, что в результате эксплуатации НБВС положение центра масс обрабатываемого вала постоянно изменяется и сечение с максимальным статическим прогибом перемещается вдоль оси.

Таким образом, в результате теоретических и экспериментальных исследований условий обработки НБВС чашечными резцами с непрерывно обновляющейся кромкой установлено: наличие прогиба в статическом положении НБВС существенно снижает виброустойчивость процесса обработки и влияет на обеспечение точности; возникающее в результате обработки усилие резания приводит к существенному отклонению обрабатываемого вала от упругого состояния равновесия и соответственно к снижению виброустойчивости процесса обработки и искажению формы вала в продольном сечении; применение для обработки НБВС чашечных резцов с непрерывно обновляющейся кромкой позволяет за счет изменения скорости обновления режущей кромки в течение рабочего хода осуществлять изменение положения вершины режущего элемента по отношению к заготовке, тем самым управляя точностью обработки, и варьировать величиной составляющих усилия резания для поддержания виброустойчивости процесса обработки; влияние изменения положения центра масс вдоль длины обработки на точность и вибро-

устойчивость можно также компенсировать за счет изменения скорости обновления режущей кромки в соответствии с законом изменения положения сечения с максимальным результирующим перемещением вдоль длины обработки, учитывая при этом скорость формирования износа на рабочих поверхностях режущего элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жолобов, А. А.** Особенности обработки набивных бумажных валов суперкаландра (НБВС) резцами с обновляющейся режущей кромкой / А. А. Жолобов, В. А. Логвин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 80–88.
2. **Жолобов, А. А.** Перспективы развития лезвийной обработки длинномерных изделий для бумажной промышленности / А. А. Жолобов, В. А. Логвин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – Ч. 1. – С. 3–10.
3. **Беляев, Н. М.** Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М. : Наука, 1965. – 856 с.
4. **Алямовский, А. А.** SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
5. **Сегерлинд, Л.** Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.
6. **Секулович, М.** Метод конечных элементов / М. Секулович. – М. : Стройиздат, 1993. – 664 с.
7. **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1979. – 541 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 15.02.2010

V. A. Logvin, A. A. Zholobov
Features of modelling of supercalander stack packed paper shafts for accuracy maintenance at processing with cup tools with continuously renovated cutting edge

In the article the order of construction of supercalander stack packed paper shafts (SSPPS) model which allows defining the size and arrangement of the section with the maximum static deflection at processing with continuously renovated cutting edge is offered. Influence of the size of the shaft deflection on accuracy and vibration resistance of SSPPS processing has been analyzed. The results of calculations of sizes of shaft deflection from the action of weight and chip loading are presented in the article, natural frequencies and mode shapes for maintenance of vibration resistance and achievement of the set accuracy at processing have been defined.

УДК 621.65.053-762-82(476)

С. П. Субботин, канд. техн. наук

РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА НИОКР ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ НАСОСОВ ТИПА ГДМ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЕЙ

Изложена краткая история создания, развития и становления компании.

На базе пионерных решений разработаны конструкции герметичных насосов с приводом через магнитную муфту, превосходящую по своим параметрам и характеристикам лучшие мировые образцы. Освоена производством компании широкая номенклатура насосных агрегатов. Даны предложения по сотрудничеству для создания экологических насосных станций с приводом от моторов, работающих на попутных газах.

Компания «Гидродинамика» основана в 1993 г. группой специалистов Института ядерной энергетики академии наук Белоруссии, имевших многолетний опыт проектирования и изготовления насосов для ядерных энергетических установок.

Опираясь на имевшийся опыт, руководством компании первоначально была разработана базовая концепция, определившая техническую политику развития компании и конструктивную схему насосных агрегатов.

Наиболее перспективным направлением была признана разработка и изготовление герметичных, динамических агрегатов горизонтального и полупогружного исполнения с приводом ротора через синхронную магнитную муфту от серийно выпускаемых электродвигателей мощностью первоначально от 5 до 250 кВт, затем – до 400; 500 и 630 кВт.

Концепция с учетом реальной экономической ситуации 90-х гг. ориентировала на создание собственной производственной базы, минимальную кооперацию, максимальную гибкость, а также жесткие сроки проектирования и изготовления насосных агрегатов под требования конкретного заказчика (не более 90 дней).

Время полностью подтвердило правильность выбранных ориентиров. С учетом постоянного ужесточения экологических требований, требований к условиям труда обслуживающего пер-

сонала и безопасности работ герметичные насосы становятся все более востребованными.

Начав с работы на арендованном оборудовании и на арендованных площадях, проводя политику жесткой экономии, при которой вся прибыль инвестировалась в развитие производства, компания сегодня имеет собственную производственную базу общей площадью более 7000 м² с комплексом производственного и испытательного оборудования, собственным конструкторским и технологическим бюро, оснащенных современным компьютерным оборудованием.

Производственная база компании имеет достаточный набор оборудования для выполнения всех технологических операций по изготовлению насосных агрегатов от порезки металла на заготовки, термообработки, штамповки, сварки, в том числе титановых сплавов и нержавеющей сталей, до точной механической обработки и динамической балансировки роторных деталей насосных агрегатов. Освоены также технологии изготовления качественных резинотехнических изделий, подшипников скольжения и упорных пят насосных агрегатов из карбида кремния. Примечательно, что для шлифовки деталей применяется алмазный инструмент исключительно белорусского производства. Технология обработки является «ноу-хау» ЗАО «Гидродинамика». Имеется аттестованное оборудова-

ние для проведения необходимых лабораторных исследований, прочностных и функциональных испытаний насосных агрегатов.

Насосные агрегаты компании (тип ГДМ) обеспечивают перекачивание таких продуктов, как стабильный газовый конденсат, нефть и нефтепродукты, диэтиленгликоль, аммиак, ШФЛУ, вода и водометанольная смесь, бензин, дизельное топливо с расходами от 5 до 1250 м³/ч при напорах от 30 до 1000 м, для чего разработано более 60 моделей горизонтальных насосов, своими техническими параметрами равномерно охватывающих указанный диапазон.

Для откачки жидкостей из цистерн

и технологических емкостей разработан и освоен выпуск более 20 моделей полупогружных агрегатов, обеспечивающих при глубине погружения от 2,7 до 6,2 м работу с подачами от 10 до 200 м³/ч и напорами до 350 м.

Для вращения роторов насосных агрегатов типа ГДМ используются герметичные магнитные муфты с разделительным экраном. Применение в приводе насоса магнитной муфты исключает выход приводного вала за пределы прочной части насоса и необходимость уплотнения вращающегося вала сальниковыми или торцовыми уплотнениями, не исключающими протечек перекачиваемого продукта (рис. 1).

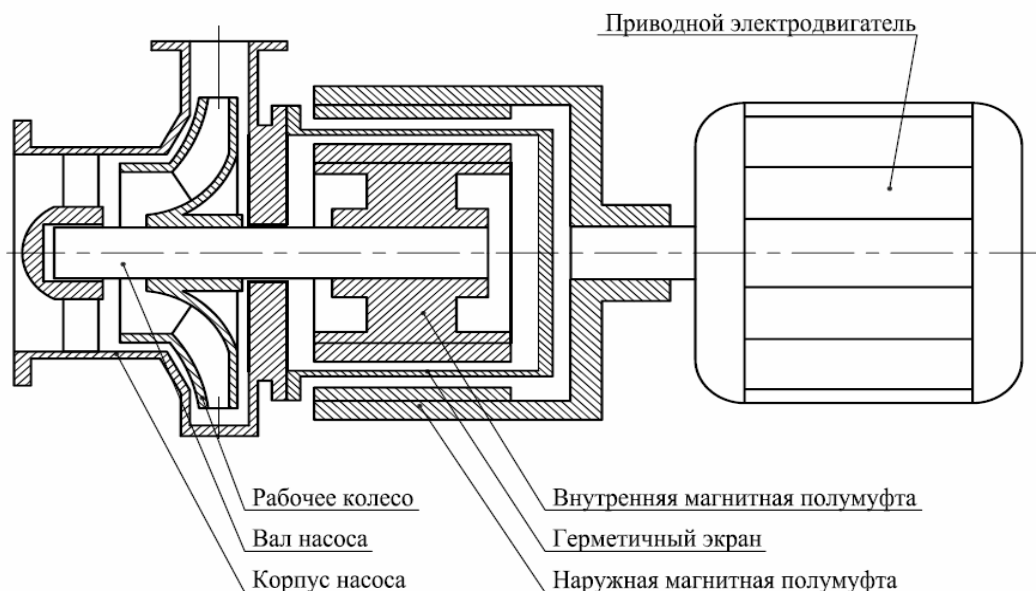


Рис. 1. Схема насосного агрегата с магнитной муфтой

Как видно из схемы, мощность от электродвигателя передается на насос через магнитную муфту, которая посредством магнитных сил приводит во вращение ротор насоса. Магнитная муфта состоит из наружной полумуфты, соединенной с приводным электродвигателем, внутренней полумуфты, соединенной с ротором насоса, и разделительного экрана, обеспечивающего герметизацию проточной полости агрегата.

Разработанный и доведенный ряд магнитных муфт обеспечивает в насосных агрегатах типа ГДМ передачу на ротор насоса до 630 кВт мощности от взрывозащищенных электродвигателей.

В связи с вышесказанным представляет интерес магнитная реактивная переменного полюсная муфта (рис. 2). Ее ротор выполнен из магнитомягкого материала и имеет выступы, взаимодействующие с полюсами магнитной систе-

мы наружной муфты. Магниты установлены только на наружной муфте. Для увеличения количества магнитов, установленных по окружности, и соответственно повышения передаваемого крутящего момента конструкция данной муфты отличается от обычных. Полюса наружной полумуфты выполнены в виде клиньев из магнитомягкого материала. Между полюсами установлены магниты, причем к полюсу примыкают два магнита одноименными полюсами. К

третьей стороне полюса примыкает еще один магнит, причем тем же полюсом, что и два магнита, расположенные по окружности. Второй полюс этого магнита примыкает к кольцевому магнитопроводу, служащему корпусом муфты. Таким образом, поток внутри полюса создается одновременно тремя магнитами, чем достигается высокая индукция в зазоре и большая сила взаимодействия между наружной и внутренней полумуфтами.

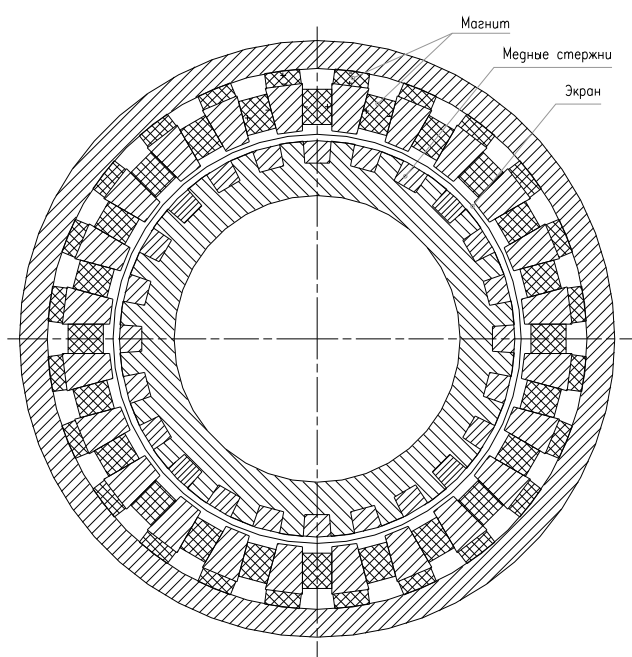


Рис. 2. Реактивная переменно-полюсная магнитная муфта

Для повышения пусковых характеристик на внутренней полумуфте между выступами уложены немагнитные электропроводные стержни. По торцам муфты стержни объединяются кольцом и образуют замкнутую электрическую систему типа «беличьей клетки», аналогичную ротору асинхронного двигателя.

Муфта работает следующим образом. При пуске начинает поворачиваться наружная полумуфта относительно внутренней. Из-за взаимного смещения магнитных полюсов изменяется магнитный поток через них, возникают

тангенциальные магнитные силы притяжения между полюсами. Также из-за изменения магнитного потока в стержнях «беличьей клетки» появляется электрический ток, поле которого взаимодействует с полем наружной полумуфты и увеличивает крутящий момент. После разгона действуют только магнитные силы, вызванные постоянным смещением полюсов. При случайном превышении этих сил во время работы появляется проскальзывание между полумуфтами и резко увеличивается крутящий момент за счет сил «беличьей

клетки». При восстановлении нормальной работы насоса скорости вращения полумуфт выравниваются.

Разработана программа, не имеющая аналогов для расчета переменнопольной реактивной муфты с тангенциальными и радиальными магнитами.

О габаритах, применяемых в наших насосах магнитных муфт, можно судить по следующим размерам. Для насосов с мощностью электропривода от 300 до 600 кВт диаметр муфты достигает 220 мм при ее длине до 200 мм. Насосы с мощностью привода до 300 кВт требуют муфты с размерами около 130 и 150 мм.

Обращаясь к себестоимости указанных конструктивов, можно привести следующие данные: муфты, указанные первыми, имеют цену примерно 4 тыс. белорус. р., вторыми – до 20 тыс. белорус. р.

Представленная схема насосных агрегатов ЗАО «Гидродинамика» по сравнению с герметичными насосами на основе встроенных электродвигателей специальной конструкции имеет более простую, гибкую, пригодную для ремонтов в эксплуатационных условиях конструкцию и позволяет применять относительно дешевые и экономичные стандартные приводные электродвигатели и легко их заменять при ремонтах.

Появлению работоспособной конструкции магнитной муфты, передающей большие мощности, предшествовала немалая научная и конструкторская работа по оптимизации параметров элементов магнитной муфты, подбору магнитов по геометрическим размерам и характеристикам магнитных материалов.

Решение на первый взгляд элементарной задачи по защите от коррозионного разрушения магнитов на основе неодим-железа-бора, происходившего на первоначальных конструкциях муфт, потребовало не только менять поставщиков магнитов, но и кардинальным образом корректировать конструкцию и технологию изготовления магнитных

полумуфт. В новых муфтах защита от коррозии магнитов обеспечивается трехслойным гальваническим покрытием магнитов специальными защитными обечайками, изолирующими их от перекачиваемого продукта, и технологией изготовления.

Отработанная методика расчета магнитных муфт, проверенная экспериментальными исследованиями, позволяет проектировать магнитные муфты для различных температурных условий (от -50 до $+250$ °С) и на различные мощности с ограниченным количеством типоразмеров применяемых магнитов и марок магнитных материалов.

В процессе доводки магнитного блока выявились довольно значительные осевые силы, возникающие между внутренней и наружной полумуфтой. Недооценка этих сил и непринятие конструктивных мер по их минимизации оказывают существенное влияние на баланс осевых сил и нагруженность упорных пят.

Одним из основных элементов магнитной муфты является разделительный экран, обеспечивающий герметизацию проточной части насосного агрегата и циркуляцию части перекачиваемого продукта для охлаждения магнитной муфты. Конструктивной и технологической доводке этого элемента постоянно уделяется много внимания.

Для уменьшения потерь в экране компанией проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по подбору новых видов материалов. Созданный опытный тонкостенный экран из неметаллического материала выдерживает внутреннее давление до 6 МПа и температуру до 100°C .

Начав с точеных экранов из нержавеющей стали, сегодня мы изготавливаем и применяем тонкостенные экраны из титановых сплавов, выдерживающие давление до 8,0 МПа, что позволяет существенно повысить допустимое давление на входе в насос и надежность агрегата во внештатных ситуациях. Потери в магнит-

ной муфте при этом не превышают 8 %.

Для исключения случаев повреждения экрана абразивными магнитными примесями, содержащимися в перекачиваемых продуктах, были проведены ОКР по оптимизации потока перекачиваемого продукта под экраном и снижению концентрации примесей в опасных зонах.

Учитывая принятые сроки проектирования и изготовления агрегатов под требования заказчика, мы были вынуждены освоить изготовление сварных вариантов центробежных насосных колес и направляющих аппаратов, значительно превосходящих по чистоте рабочих поверхностей, остаточному дисбалансу и другим показателям литые колеса. Помимо этого, при большой номенклатуре колес и мелкосерийном производстве эта технология значительно сокращает сроки подготовки производства и уменьшает трудоемкость изготовления колес.

Принятая схема герметичных насосных агрегатов однозначно определила применение подшипников и упорных пят, смазывающихся только перекачиваемым продуктом. Наиболее приемлемым материалом для большинства перекачиваемых продуктов по совокупности свойств является карбид кремния. Карбид кремния, по сравнению с применяемым ранее силицированным графитом, имеет целый ряд преимуществ в части надежности, долговечности и стойкости в условиях абразивного износа. Однако механическая обработка этого материала, имеющего твердость, близкую к твердости натурального алмаза, представляет определенную сложность. Мы одними из первых в СНГ начали обрабатывать карбид кремния с применением на предварительной обработке операции точения специальными резцами, разработанными белорусскими учеными, что существенно снизило трудоемкость предварительных операций.

Одной из типичных проблем при эксплуатации герметичных насосных агрегатов отечественных и зарубежных фирм являются отказы и интенсивный износ подшипников и упорных пят, обу-

словленные несоответствием перекачиваемых продуктов требованиям эксплуатационной документации в части содержания в них механических и ферромагнитных примесей. Особенно часто такие отказы происходят при установке насосных агрегатов на новые трубопроводы и технологические установки.

Учитывая неизбежность таких проблем при существующем уровне эксплуатации насосных агрегатов, мы вынуждены были разработать специальный магнитно-сетчатый фильтр, который позволяет обеспечить очистку части перекачиваемого продукта, используемого для смазки подшипников скольжения и охлаждения магнитной муфты, от ферромагнитных примесей.

Этот фильтр обеспечивает тонкость фильтрации частиц 60 мкм при расходе до 6 м³/ч и работает при давлении на входе до 5 МПа. Применение фильтра позволило резко сократить число отказов при работе насосов на продуктах, несоответствующих по наличию примесей требованиям эксплуатационной документации на насосные агрегаты, и существенно сократить ставшими почти привычными затраты на ремонт насосов, установленных на новых, недостаточно хорошо очищенных трубопроводах. Насосные агрегаты ГДМ8-03 (подача 125 м³/ч, напор 700 м, мощность 400 кВт) с такими фильтрами отработали на перекачивании нефти в ОАО «РИТЭК» более 10 000 ч без отказов и практически без износа подшипников скольжения и упорных пят.

Кроме технического уровня, закладываемого при конструировании, на надежность и фактический технический уровень насосных агрегатов существенно влияет и организация производства от закупки материалов и комплектующих изделий до приемки и испытания готовой продукции. Постоянное внимание к организационным вопросам позволило нам сертифицировать сложившуюся организацию работ по проектированию и изготовлению насосных аг-

регатов на соответствие требованиям ИСО 9001-2000 в 2004 г.

Четкая организация и управление всеми звеньями позволяет обеспечивать стабильное качество продукции в непростых «рыночных» условиях.

Так, при закупке материалов и комплектующих выявили печальные реалии, образовавшиеся в последнее время в сфере материально-технического снабжения. Закупка небольшими компаниями металлопроката и подшипников качения через многочисленных дилеров и посредников существенно снизила как качество закупаемых материалов, так и степень их соответствия прикладываемым сопроводительным документам и сертификатам.

ЗАО «Гидродинамика» было вынуждено помимо жесткого отбора партнеров-поставщиков ввести 100 % обязательный лабораторный входной контроль всего металлопроката, увеличить коэффициенты запасов прочности нагруженных элементов насосных агрегатов и ввести 100 % прочностные гидравлические испытания всех элементов проточной части насосных агрегатов.

Такие меры позволили свести практически к нулю количество претензий и замечаний по качеству от потребителей агрегатов и ликвидировать проблемы по свариваемости элементов конструкции агрегатов в процессе производства.

Аналогичные проблемы выявились и по подшипникам качения, используемым в приводах насосных агрегатов. Безрезультатный поиск надежных поставщиков и попытки наладить отбор качественных подшипников заставили нас пойти на дополнительные затраты и начать с 2003 г. 100 % комплектацию насосных агрегатов подшипниками фирм «SKF» или «FAG».

Такой подход позволил создать и поставить на производство целый ряд герметичных насосных агрегатов. Хорошо зарекомендовали себя у различных потребителей насосные агрегаты

ГДМ8-03 с подачей 125 м³/ч при напоре 700 м, ГДМ21-04 с подачей 25 м³/ч при напоре 900 м, ГДМ10-04 с подачей 220 м³/ч при напоре 600 м, ГДМДЗ с подачей 1250 м³/ч при напоре 40 м.

Герметичный динамический агрегат ГДМ8-03 с электродвигателем мощностью 400 кВт имеет отработанную конструкцию и успешно применяется для транспортировки нефти. При модернизации системы транспортировки нефти в компании «РИТЭК Белоярск-нефть» один агрегат ГДМ8-03 заменял от трех до пяти поршневых насосов.

Представляет интерес полупогружной насосный агрегат с приводным электродвигателем мощностью 90 кВт типа ГДМП10-Е-200/120-4,2-90, обеспечивающий при глубине погружения до 4,2 м подачи в рабочей зоне от 100 до 220 м³/ч при напорах от 130 до 80 м.

Среди новых разработок – герметичный агрегат ГДМ16-10 с подачей 1500 м³, напором 160 м и суммарной мощностью электродвигателей 1000 кВт. Эти агрегаты выиграли в 2008 г. тендер по комплектации нефтяной магистрали Восточная Сибирь – Тихий океан.

Агрегаты типа ГДМ успешно эксплуатируются на нефтегазодобывающих и перерабатывающих предприятиях ОАО «Газпром», ОАО «Лукойл «Томскгазпром», ОАО «Таркосаленефтегаз», ОАО «РИТЭК», ООО «Ноябрьскгазодобыча», ООО «Юрхаровнефтегаз», ОАО «Ямбурггазодобыча», ПО «Нафтан», Хабаровский НПЗ НК «Альянс», ОАО «Казаньоргсинтез» и др. (рис. 3–6).

Конструкция насосных агрегатов типа ГДМ защищена патентами Республики Беларусь № 33, 433, 633, 2497, 2500, 2574, 2853 и свидетельствами Российской Федерации на полезные модели № 9904 и 9905. Соответствие требованиям российских стандартов подтверждено сертификатом № РОСС ВУ Н003.В00054 и разрешением № РРС02-10325 на применение, выданным Госгортехнадзором России.

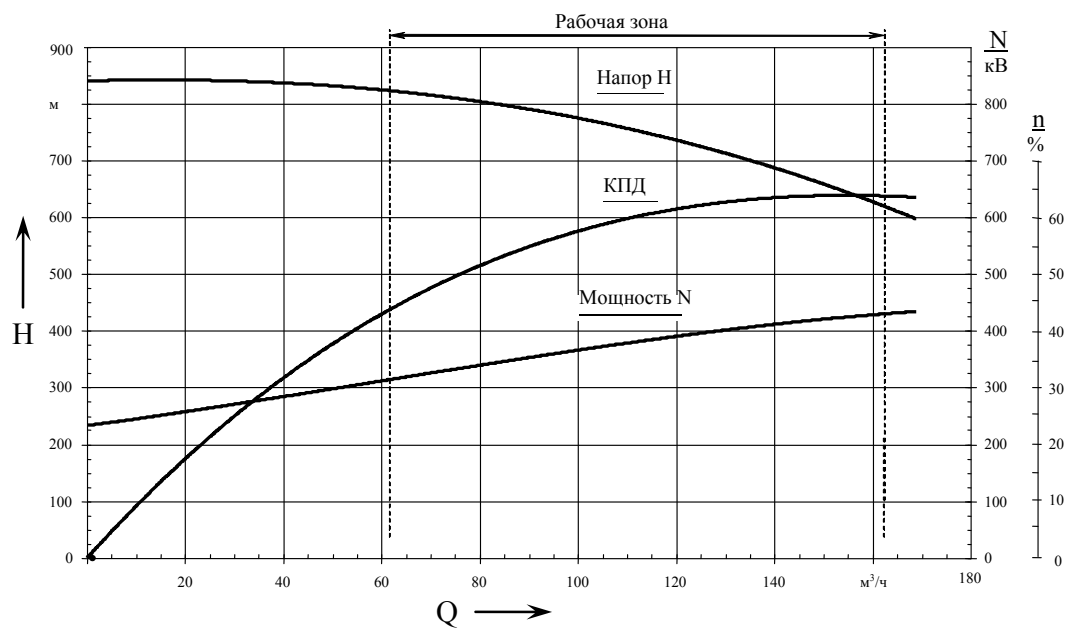


Рис. 3. Характеристика агрегата ГДМ8-03-125/700



Рис. 4. Насосные агрегаты ГДМ8-03-125/750-400 в НПУ «РИТЭК Белярскнефть»



Рис. 5. Насосные агрегаты ГДМ8-03-125/700-400 для ОАО «Лукойл-Пермь»



Рис. 6. Полупогружной агрегат ГДМП10-Е-200/100-90

Компания также имеет соответствующие лицензии Проматомнадзора РБ на право проектирования, изготовления и ремонта динамических насосов и оборудования для химических производств и процессов, где возможно образование взрывоопасных сред.

Следующий шаг по улучшению экологичности насосных агрегатов, эксплуатируемых в нефтегазодобыче и переработке, по нашему мнению, – замена электропривода на газомоторный, предназначенный работать на попутном газе, который сегодня в больших объемах сжигается в факелах со всеми негативными экологическими последствиями. В заключение предлагаем сотрудничество в разработке, изготовлении и поставке автоматизированных насосных станций с приводами от газовых моторов. Готовы обсудить и спланировать работы, условия взаимодействия. Одновременно подтверждаем обязательство

нашей стороны разработать и изготовить в короткие сроки насосы по согласованным техническим требованиям и ТЗ. Надеемся, что насосные станции могут быть предложены ряду отраслей и химических производств, где имеются другие газы, которые могут служить топливом для моторов.

Уровень разработок, качество наших насосов оценено учредителями Национальной премии «Живой поток», среди которых Российская ассоциация производителей насосов (РАПН), Российская инженерная академия, МВК, Сертификационный центр «НАСТХОЛ» (ТК-245 «Насосы»), Информационно-издательский центр КХТ.

В 2008 г. ЗАО «Гидродинамика» – резиденту свободной экономической зоны «Минск», члену РАПН за представленный на конкурс герметичный динамический насос присвоена названная премия в номинации «Лучший насос».

ЗАО «Гидродинамика»
Материал поступил 14.07.2009

S. P. Subbotin

Realization of a complex of research and development on perfection of pumps of GDM type for oil-and-gas and chemical branches

The short history of creation, development and company formation is given in the article.

On base of pioneer decisions designs of glandless pumps with a drive through a magnetic clutch, surpassing in the parametres and characteristics the best world samples have been developed. The wide range of pump units has been mastered by the company manufacture.

УДК 621.357

К. А. Токменинов, канд. техн. наук, доц., В. А. Широченко, канд. техн. наук, доц.

СПОСОБ АНТИКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ЦИНКОВАНИЯ

Рассмотрена технология антикоррозионной защиты черных металлов путем нанесения на поверхность мелкодисперсного цинка холодным способом. Приведены результаты климатических испытаний оцинкованных различными способами образцов, подтверждена экономическая эффективность внедрения технологии холодного цинкования.

Наиболее эффективной и экономически целесообразной защитой черных металлов от коррозии является цинкование поверхностей изделий.

В настоящее время в Республике Беларусь отсутствуют предприятия, обеспечивающие цинкование изделий. Как правило, для нанесения таких покрытий предприятия Республики Беларусь вынуждены обращаться в Российскую Федерацию или Украину.

Традиционной является технология нанесения цинка так называемым горячим способом – методом окунания изделия в расплав цинка. Однако в последнее время разработана более эффективная и экологически безопасная технология нанесения цинка на металлические поверхности холодным способом.

Во второй половине 90-х гг. XX в. в Гентском университете (Бельгия) была разработана технология холодного цинкования металлоконструкций без их разборки на месте монтажа. Указанная технология позволяет получить покрытие, которое по своим свойствам не уступает покрытию, полученному традиционным горячим цинкованием. В настоящее время указанная технология получает широкое распространение и активно используется на предприятиях бывшего РАО ЕС, ОАО «Мосэнерго», ОАО «Гродноазот» и др.

Для защиты черных металлов от ржавчины применяется «зинганизация» уже смонтированного объекта составами ZINGA бельгийской компании «Зин-

га метал», содержащими до 96 % цинка. Способ нанесения ZINGA также прост, как окраска, и защищает металл от коррозии лучше, чем любое другое цинковое покрытие, так как наряду с анодной защитой обеспечивает дополнительно барьерную защиту.

ZINGA – это промышленный высококачественный продукт, представляющий собой однокомпонентный жидкий состав (полностью готовый к применению), состоящий из электролитического цинка чистотой 99,995 % (DIN 1706 – ISO 752), летучих веществ (ненасыщенных углеводородов) и связующих агентов (нейтральных смол). В высохшем слое покрытия содержится 96 % цинка (DIN 55 969 – ISO 354-1976), что обеспечивает надежную катодную (активную) защиту железа от коррозии.

Одним из самых убедительных достоинств ZINGA, несомненно, является тот факт, что оно может наноситься на рабочей площадке, а не только в цеху. Все другие способы «оцинковки» осуществимы лишь на специализированных производственных участках в цехах. Антикоррозионное покрытие ZINGA же можно наносить повсеместно, причем как при нормальных атмосферных условиях, так и в широком диапазоне температур и даже во влажной среде; как на все новые и старые черные металлы, так и на ранее оцинкованные поверхности.

Область применения технологий и материалов холодного цинкования весьма широка, в том числе в энергетике, су-

достроении, на химических предприятиях, в строительстве и др.

В последнее время на российский рынок поступил новый бельгийский продукт для холодного цинкования PROZINC PU PRIMER, который является дальнейшим развитием состава ZINGA, имеющий меньшую стоимость и повышенный эффект антикоррозионной защиты. Это однокомпонентный цинконаполненный полиуретановый состав.

В Беларуси официальный дилер поставляет пока только составы ZINGA.

Для подтверждения эффективности использования указанных составов для холодного цинкования в филиале Энергоремонт РУП «Могилевэнерго» была разработана программа испытаний, изготовлено необходимое оборудование и проведены климатические испытания покрытий из указанных материалов, а также образцов с цинковым покрытием, нанесенным промышленным горячим способом на специализированном предприятии.

Испытания покрытий металлов на основе антикоррозионных цинкосодержащих материалов на атмосферостойкость выполнялись в филиале Энерго-

ремонт РУП «Могилевэнерго» для определения стойкости антикоррозионных цинкосодержащих покрытий ZINGA, PROZINC PU PRIMER, цинкового покрытия, нанесенного промышленным горячим способом на специализированном предприятии, в соответствии с разработанной программой испытаний.

За основу методики ускоренных испытаний на атмосферную стойкость был взят ГОСТ 9.401-91, методы 5.6 (для условий эксплуатации в районах с умеренным и холодным климатом).

Испытания проводились в специально изготовленной камере, оборудованной ТЭНами для обеспечения температуры испытаний до +80 град (табл. 1). Для поддержания относительной влажности не менее 97 % в указанной камере была установлена емкость с водой. Зеркало поверхности воды составляло не менее 60 % площади основания камеры.

Температура в камере контролировалась с помощью термометра. При указанных параметрах зеркала воды влажность в процессе испытаний обеспечивалась 97...100 % и дополнительно не контролировалась.

Табл. 1. Сводная характеристика образцов

Номер образца	Материал и размеры образца	Подготовка поверхности	Материал покрытия	Толщина покрытия, мкм
1	Уголок сталь Ст 3 50×50×4, L = 350 мм	Зачистка до металлического блеска, обезжиривание поверхности	PROZINC PU PRIMER	80
2	Уголок сталь Ст 3 50×50×4, L = 350 мм	Зачистка до металлического блеска, обезжиривание поверхности	ZINGA	80
3	Болт М20, гайка М24	Без подготовки	Цинк (горячим способом)	50–80
4	Уголок сталь Ст 3 50×50×4, L = 350 мм	Обезжиривание поверхности	PROZINC PU PRIMER	80
5	Уголок сталь Ст 3 50×50×4, L = 350 мм	Обезжиривание поверхности	ZINGA	80
6	Уголок сталь Ст 3 50×50×4, L = 350 мм	Без подготовки	Без покрытия	—

При проведении испытаний в камере образцы ежесуточно выдерживались 8 ч при температуре 80 град.

В связи с тем, что температура испытаний и время выдержки по сравнению с ГОСТ 9.401-91 повышены в 2 раза (в соответствии с ГОСТ 9.401-91 в камере предусматривается выдержка образцов 4 ч в сутки при температуре 40 град), процессы коррозии в течение 1 сут (цикл) пройдут приблизительно в 4 раза быстрее. Таким образом, для пересчета допустимого срока эксплуатации металлоконструкций в реальных атмосферных условиях может быть введен коэффициент $k = 4$.

Испытания по данной методике проводились в течение 22 дн., что с уче-

том введенного коэффициента $k = 4$ соответствует количеству циклов по ГОСТ 9.401-91 приблизительно $22 \cdot 4 = 88$. Из проведенных ранее испытаний в ОАО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства» (РФ) после 60...80 циклов дальнейших изменений в покрытии не наблюдается и дальнейшие испытания не целесообразны.

Проведенные испытания соответствуют не менее 10...15 годам эксплуатации конструкций в умеренном и холодном климате.

Ниже представлены фотографии образцов с покрытий PROZINC PU PRIMER до начала испытаний (рис. 1) и после их проведения (рис. 2).

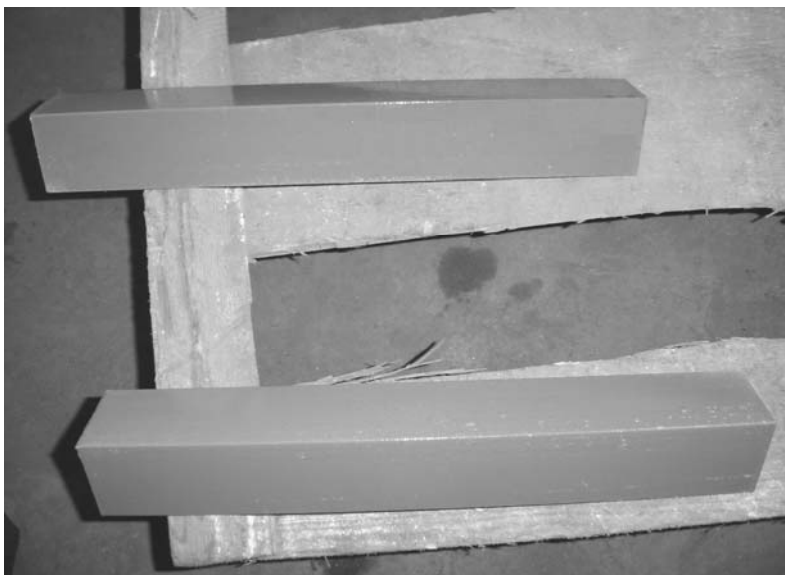


Рис. 1. Образцы после нанесения покрытия PROZINC PU PRIMER до начала испытаний

Испытания подтвердили результаты, полученные в ОАО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства».

Был проведен анализ выпуска продукции для энергетики Республики Беларусь, потенциально нуждающейся в оцинковании, и подобраны оптимальные уравнения тренда. Результаты анализа представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видна устойчивая динамика роста спроса на оцинкование металлоконструкций в энергетике. Приблизительно такой же рост спроса на цинковые покрытия отмечается и в других отраслях.

Исходные данные для инвестиционного проектирования внедрения технологии холодного оцинкования представлены в табл. 2 и 3.



Рис. 2. Образцы после нанесения покрытия PROZINC PU PRIMER после проведения испытаний

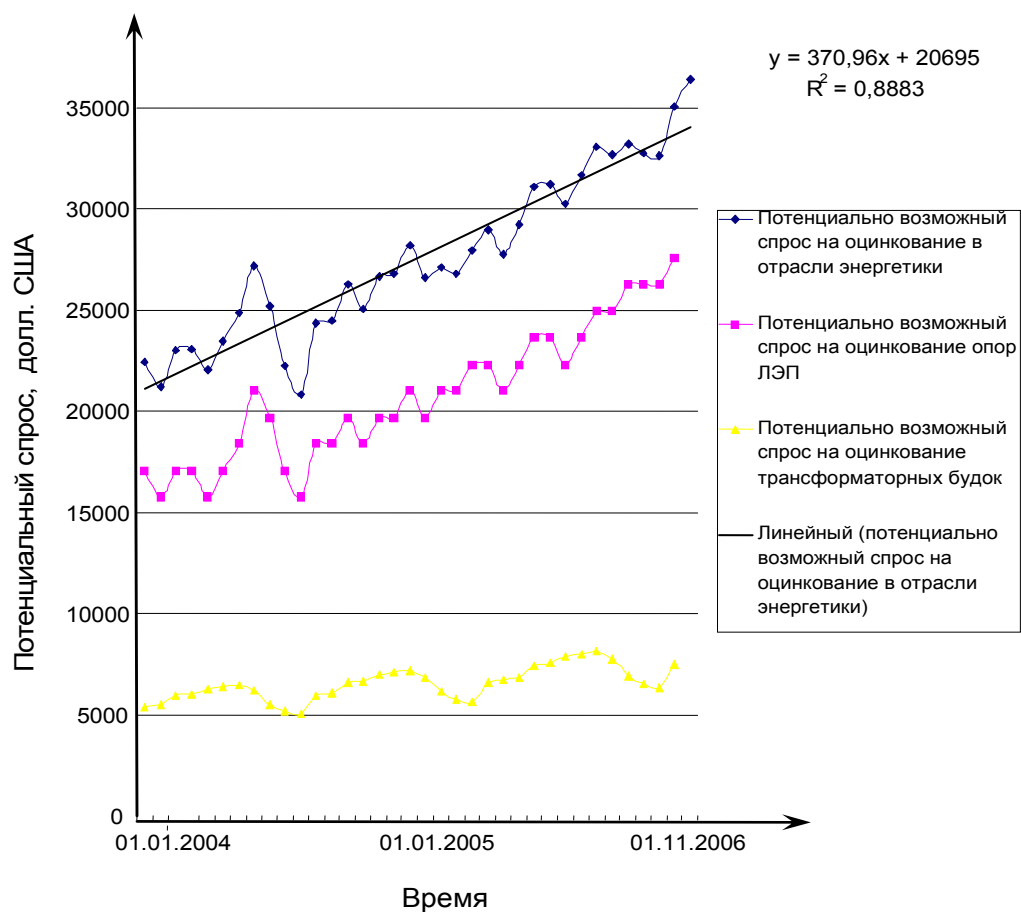


Рис. 3. Динамика потенциального спроса на оцинкование в энергетике за 2004...2006 гг.

Табл. 2. Капиталовложения в строительство и эксплуатацию линии холодного оцинкования

В долларах США

Аргумент функции принадлежности	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
A	50 000	50 000	200	200	200	200
B	55 000	55 000	350	350	350	350
C	75 000	75 000	450	450	450	450
D	78 000	78 000	500	500	500	500

Табл. 3. Объём реализации услуги холодного оцинкования

В долларах США

Аргумент функции принадлежности	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
A	0	233 146	265 288	288 137	306 173	321 207
B	0	283 146	315 288	338 137	356 173	371 207
C	0	318 146	350 288	373 137	391 173	406 207
D	0	333 146	365 288	388 137	406 173	421 207

В данных таблицах А соответствует нижнему левому значению аргумента функции принадлежности, В – верхнему левому, С – верхнему правому, D – нижнему правому значению.

Ставка дисконта – 11 %.

Горизонт расчёта – 6 лет.

Чистый приведенный доход после реализации всего инвестиционного проекта составит от 1 069 313 до 1 236 966 долл. США, срок окупаемости – от 1,23 до 1,39 лет, внутренний коэффициент окупаемости – 3,84, функции риска свидетельствуют о том, что проект обязательно должен быть прибыльным и окупится.

Выводы

1. Испытания покрытий PROZINC PU PRIMER, ZINGA и изделий, покрытых слоем цинка промышленным горячим способом, проведены на основе методики ускоренных испытаний на атмосферную стойкость по ГОСТ 9.401-91, методы 5.6 (для условий эксплуатации в районах с умеренным и холодным

климатом).

2. Проведенные испытания моделируют реальную эксплуатацию металлоконструкций в условиях умеренно-холодного климата (Республика Беларусь) в течение 10–15 лет.

3. По результатам испытаний установлено, что материалы PROZINC PU PRIMER и ZINGA, нанесенные методом холодного цинкования, существенно лучше прошли испытания на стойкость к атмосферной коррозии, чем оцинкованные горячим способом на специализированном предприятии изделия и контрольный образец.

4. Испытаниями выявлено, что покрытие PROZINC PU PRIMER отличается более высокой стойкостью к атмосферной коррозии, чем покрытие ZINGA.

5. С учетом материалов испытаний, проведенных ОАО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства», и испытаниями, проведенными в филиале Энергоремонт РУП «Могилевэнерго», можно прогно-

зировать защиту металлоконструкций от коррозии материалом PROZINC PU PRIMER на срок до 25 лет.

6. В филиале Энергоремонт РУП «Могилевэнерго» в 2008 г. изготовлена партия ферменных металлоконструкций (опоры линий электропередач) общей массой 80 т, которые были защищены от коррозии составом ZINGA, и подтверждена высокая технологичность указанных составов.

7. Применение составов ZINGA и PROZINC PU PRIMER экономически эффективно. Опыт применения их для опор линий электропередач показывает,

что стоимость покрытия изделий указанными составами почти в 1,5 раза меньше, чем при горячем цинковании с учетом транспортных и технологических составляющих, а срок окупаемости инвестиций составляет 1,23...1,39 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ящерицын, П. И.** Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск : Выш. шк. 1985. – 286 с. : ил.
2. **Проскурин, Е. В.** Цинкование / Е. В. Проскурин, В. А. Попович, А. Т. Мороз. – М. : Металлургия, 1988. – 291 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 13.07.2009

K. A. Tokmeninov, V. A. Shirochenko
The way of anticorrosive protection of metals
by the method cold zink plating

The technology of anticorrosive protection of ferrous materials by laying fine-dispersed zink on a surface by cold way is given in the article. The results of environmental tests of the samples zinked in various ways are presented, economic efficiency of introduction of the technology of cold zink plating has been proved.

УДК 621.791.753.0

**А. И. Хабибуллин, Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, доц.,
Ф. Г. Ловшенко, д-р техн. наук, проф.**

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ ВЫДАВЛИВАНИЯ В ЗАГОТОВКАХ ИЗ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ МЕДИ

Рассмотрены особенности процесса обратного выдавливания экструдированных заготовок, изготовленных из дисперсно-упрочненной меди. Для определения предельной глубины выдавливания использовалась методика, разработанная А. М. Дмитриевым и А. Л. Воронцовым, которая показала высокую качественную и количественную сходимость расчетных и экспериментальных данных и позволила воспроизвести реальные закономерности процесса выдавливания и принять обоснованные решения по выбору штамповочных переходов и прессового оборудования.

Введение

Для крупносерийного и массового производства особое значение имеет способность материала подвергаться обработке давлением. Известно, что по сравнению с обработкой резанием применение этого метода позволяет примерно в 2 раза сократить расход материала, на порядок повысить производительность, улучшить эксплуатационные свойства изделия и значительно снизить себестоимость.

При разработке технологического процесса обработки давлением композиционного материала необходимо определить схему технологического процесса и режимы для каждой операции: температуру начала и конца деформации, степень и скорость деформации, необходимые для деформирования усилия и оборудование.

При оценке предельных деформационных возможностей новых металлических материалов в конкретных процессах обработки металла давлением (ОМД) в [1, 2] предлагают следующую схему оценки пластичности материалов:

- произвести качественную оценку пластичности исследуемого материала в рабочем интервале температур по результатам простых или технологических испытаний на пластичность;
- по результатам этих испытаний определить возможность подвергать его обработке давлением;

– при необходимости, путем приближенного моделирования конкретного процесса ОМД определить участок начала разрушения в очаге деформации, факторы, влияющие на него и пределы их значимости;

– непосредственным моделированием заданного процесса ОМД, соблюдая условия подобия по факторам, оказывающим влияние на пластичность и расположение опасной зоны, определить предельные по пластичности режимы деформации.

Наиболее сложной операцией механической обработки изделий из дисперсно-упрочненной меди является получение в заготовках глубоких глухих и сквозных отверстий. Вследствие этого разработка процесса прошивки отверстий в заготовках из дисперсно-упрочненных композиционных материалов (ДУКМ) при изготовлении рабочих каналов токоподводящих накопечников, а также водоохлаждающих каналов электродов контактной точечной сварки является насущной потребностью.

На практике в расчетах степени деформации при выдавливании полых цилиндрических изделий обычно используют формулу, представляющую собой отношение начальной площади поперечного сечения к конечной [5]. Однако указанная формула предполагает мгновенное получение накопленной

деформации уже с момента начала выдавливания и неизменное значение накопленной деформации по ходу выдавливания, что является грубым упрощением. Исследования по выдавливанию полых изделий [3–5] приводят к выводу, что поле деформаций не стационарно по всей пластической области. В каждой точке зоны нестационарного поля деформации по мере внедрения пуансона продолжают возрастать, что подтверждается непрерывным ростом твердости в этой зоне.

Методика, разработанная А. М. Дмитриевым и А. Л. Воронцовым [3–5], позволяет принять обоснованные решения по выбору штамповочных переходов, прессового оборудования и обеспечения прочности штампового инструмента для выдавливания. Использование соотношений теории конечных деформаций позволяет теоретически определять накопленные деформации и распределение механических характеристик в полых изделиях, получаемых обратным выдавливанием.

Целью данного исследования являлось установление предельной глубины выдавливания отверстий в заготовках, полученных экструдированием дисперсно-упрочненной меди.

Методика исследования

Для определения коэффициента трения μ_1 при обратном выдавливании, необходимого для расчетов высоты очага пластической деформации h , использовался метод, предложенный С. И. Губкиным.

Определение фактора трения μ_1 производилось для двух этапов выдавливания – начального и конечного. В качестве материала для пуансона применялась сталь Р6М5, твердость – 63...65 HRC, шероховатость поверхностей рабочей части пуансона – Ra 0,63. Для изготовления матрицы применялась сталь 5ХНМ, твердость – 41...44 HRC, шероховатость поверхности канала матрицы – Ra 0,08, конусность – $0^\circ 40'$.

При определении фактора трения

для начального этапа выдавливания заготовки из дисперсно-упрочненной меди нагревались до температуры начала обработки давлением 800 °С, матрица и пуансон – до 400 °С. Рабочая поверхность пуансона перед началом деформирования смазывалась маслом «Литол–24».

Для установления фактора трения на конечном этапе выдавливания заготовки имели температуру конца обработки давлением 700 °С, а для моделирования состояния смазки на поверхностях пуансона непосредственно перед испытанием производилось выдавливание отверстия заданной глубины в соответствующем изделии из исследуемого материала. Для предотвращения окисления поверхности заготовки, в данном случае, подвергались нагреву в среде аргона.

Фактор трения μ между заготовкой и матрицей определялся по методу И. Я. Тарновского осадкой клиновидного образца [6]. На боковой грани клиновидного образца длиной 100 мм наносились вертикальные риски с интервалом 2 мм.

После осадки образца между наклонными плитами все риски искривляются согласно рис. 1, за исключением одной. Вертикальная риска соответствует расположению нейтрального сечения, в котором отсутствует относительное скольжение металла образца по плитам.

Материал для изготовления плит – сталь 5ХНМ, твердость – 41...44 HRC, шероховатость рабочих поверхностей – Ra 0,08, температура нагрева плит – 400 °С.

При определении фактора трения μ для начального этапа выдавливания клиновидный образец из дисперсно-упрочненной меди нагревался до температуры начала обработки давлением 800 °С. Рабочая поверхность плит перед началом деформирования смазывалась маслом «Литол–24».

При установлении фактора трения для конечного этапа выдавливания об-

разец имел температуру конца обработки давлением 700°C , а для моделирования состояния смазки на поверхностях плит непосредственно перед испытанием предварительно производилась осадка образца из исследуемого мате-

риала, нагретого до 800°C . После предварительной осадки свежая смазка не наносилась. Для предотвращения окисления поверхности клиновидный образец подвергался нагреву в среде аргона.

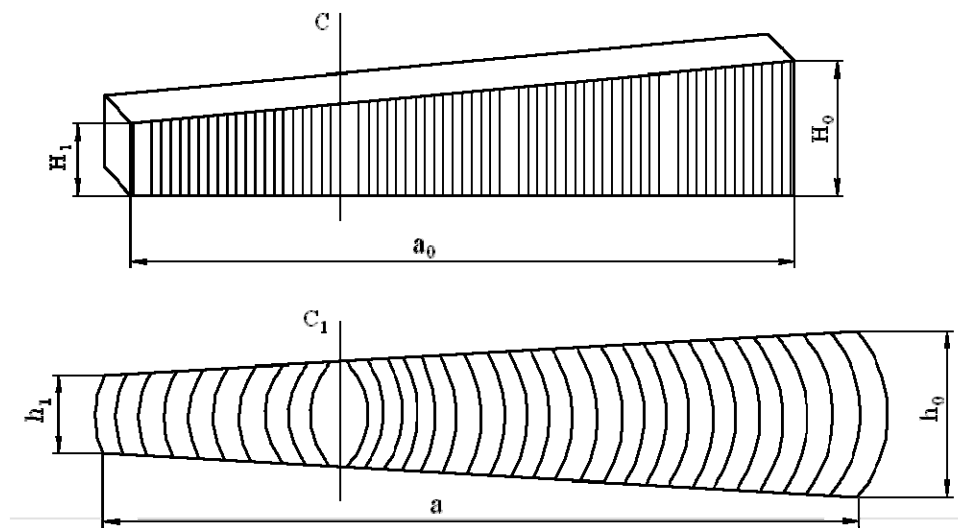


Рис. 1. Схема искривления вертикальных линий клиновидного образца при осадке

Результаты исследования и их обсуждение

Для случая с высотой очага пластической деформации меньше толщины дна выдавливаемого изделия расчет предельной глубины выдавливаемой полости за один переход состоит из следующих пунктов.

1. Определяется высота очага пластической деформации h . При отсутствии деформационного упрочнения (что является важной технологической особенностью ДУКМ) высота h определяется по формуле [5, с. 11]

$$h = \sqrt{\frac{(R^2 - 1)(0,5 + \mu_1)}{2(1 + 2\mu R)}}, \quad (1)$$

где μ – фактор трения (коэффициент трения по напряжению текучести) между заготовкой и матрицей; μ_1 – фактор трения между заготовкой и пуансоном.

В результате испытаний было установлено: для начального этапа выдавливания фактор трения μ_1 имеет значения $0,26 \dots 0,28$, для конечного – $0,29 \dots 0,30$.

Фактор трения μ между заготовкой и матрицей определялся после осадки образца между наклонными плитами, по расположению вертикальной риски. Расположение нейтрального сечения зависит от фактора трения и угла клина. Согласно рис. 2 в зоне I на клиновидный образец действуют нормальная сила N' и сила трения T' , а в зоне II – N'' и T'' .

Так как образец как целое не перемещается, все силы находятся в равновесии и сумма проекций всех сил на горизонтальную ось равна нулю или

$$2N_x' + 2N_x'' + 2T_x'' = 2T_x', \quad (2)$$

где

$$N_x' = N' \sin \frac{\alpha}{2}; \quad N_x'' = N'' \sin \frac{\alpha}{2};$$

$$T'_x = T' \cos \frac{\alpha}{2}; \quad T''_x = T'' \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (3)$$

При отсутствии прилипания $T' = fN'$ и $T'' = fN''$. Нормальные силы можно выразить через удельные давления и поверхности соприкосновения: $N' = p'bx$ и $N'' = p''bx''$. Подставив в выражение (3) значения нормальных сил и сил трения, приняв удельные давления в зонах I и II равными между собой и произведя сокращения на p и b , получаем

$$\sin \frac{\alpha}{2} (x' + x'') + fx'' \cos \frac{\alpha}{2} = fx' \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (4)$$

или

$$x' + x'' = f \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} (x' - x''). \quad (5)$$

Отсюда

$$f = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{x' + x''}{x' - x''}. \quad (6)$$

Фактор трения находится по выражению (6) после подстановки значений угла α и расстояний x' и x'' .

В результате испытаний было установлено: для начального этапа выдавливания фактор трения μ имеет значения 0,27...0,29, для конечного – 0,29...0,31. При наличии застойной зоны под торцом плоского пуансона при $R = 1,6$ принимается $\mu_1 = 0,5$ независимо от значений μ [5], что свойственно рассматриваемому случаю.

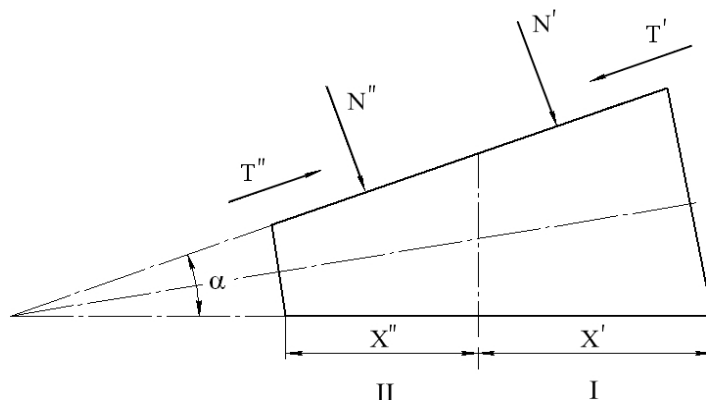


Рис. 2. Схема сил, действующих на клиновидный образец при осадке

После определения факторов трения рассчитывалась высота очага пластической деформации h :

$$h = \sqrt{\frac{(R^2 - 1)(0,5 + \mu_1)}{2(1 + 2\mu R)}} = \sqrt{\frac{(1,6^2 - 1)(0,5 + 0,5)}{2(1 + 2 \cdot 0,3 \cdot 1,6)}} = 0,63. \quad (7)$$

2. Определяется величина обжатия заготовки:

$$\psi = \frac{1}{R^2 - 1} = \frac{1}{1,6^2 - 1} = 0,64. \quad (8)$$

3. Вычисляется рабочий ход S_{CT} , при котором поле деформаций в районе, примыкающем к стенке матрицы (рис. 3, зоны 1а и 1б), становится стационарным:

$$S_{CT} = \frac{h}{\psi} \ln(1 + \psi) = \frac{0,63}{0,64} \cdot \ln(1 + 0,64) = 0,49. \quad (9)$$

Далее принимаем, что с увеличением рабочего хода $S \geq S_{CT}$ деформация в точке А перестает расти.

4. Определяется величина накопленной деформации в точке А (эта ве-

личина постоянна во всей зоне 1а):

$$e_{iA} = 1,155 \cdot \psi \cdot \frac{S}{h} = 1,15 \cdot 0,64 \cdot \frac{0,25}{0,32} = 0,56. \quad (10)$$

5. Рассчитывается средняя величина накопленной деформации на линии AD по формуле [5]

$$e_{i1} = 0,5 \left(1 - \frac{z_1}{h} \right) e_{iA} =$$

$$= 0,5 \cdot \left(1 - \frac{0}{0,63} \right) \cdot 0,56 = 0,28, \quad (11)$$

где z_1 – координата границы между зонами 1а и 1б (при $S \geq S_{CT}$, $z_1 = 0$).

6. Устанавливается, какой вариант течения материала будет присутствовать под торцом пуансона, т. е. в области 2, т. к. это определяет форму эпюра накопленных деформаций в этой области. При существовании застойной зоны под торцом пуансона эпюра e_i имеет вид кривой 1, показанной на рис. 3; при отсутствии застойной зоны – описывается кривой 2; при промежуточном случае затрудненного течения металла вблизи торца пуансона – кривой 3.

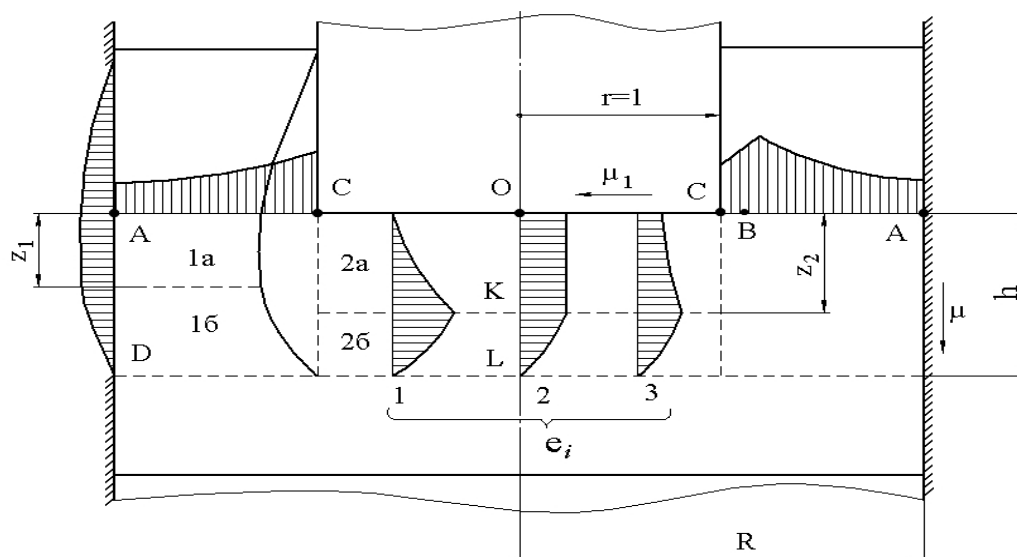


Рис. 3. Схема распределения деформаций на различных участках оснастки при обратном выдавливании

Исходя из исследований процесса образования застойной зоны можно сделать вывод [5, с. 12]: при $R < 1,15$ застойная зона отсутствует, при $1,15 \leq R \leq 1,25$ будет затрудненное течение, при $R > 1,25$ будет застойная зона. Таким образом, при $R = 1,6$ в процессе выдавливания образуется застойная зона и фактор трения $\mu_1 = 0,5$. В этом случае величина накопленной деформации на поверхности контакта с торцом пуансона равна нулю [5]:

$$e_{i0} = 0. \quad (12)$$

7. Определяется величина накопленной деформации на границе между зонами 2а и 2б (см. рис. 3, точка К):

$$e_{iK} = 2 \cdot \ln(1 + m), \quad (13)$$

где $m = S/h$.

8. Для оценки возможности образования трещин в процессе выдавливания определяется максимальная накопленная деформация на линии АС (см. рис. 3). Максимальная деформация будет находиться в точке В, расположенной недалеко от кромки пуансона (на рис. 3 она

изображена справа от пуансона на линии СА). Расположение этой точки зависит от рабочего хода пуансона и для определения накопленной деформации в этой зоне необходимо производить сложные вычисления, поэтому для упрощения вычислений можно принять, что максимальная накопленная деформация будет находиться в точке С и определить ее по приближенной формуле

$$e_{iC} = e_{iA} + 0,5 \cdot (e_{iO} + e_{iK}). \quad (14)$$

Согласно [7] основными параметрами, необходимыми для определения предельного формоизменения заготовки, являются величины накопленной деформации e_i и относительного гидростатического давления σ , отнесенного к напряжению текучести σ_s . Так как ввиду нестационарности процесса выдавливания использование интегрального условия разрушения В. Л. Колмогорова требует сложных методов вычисления, в [5] предлагается более простая методика. В процессе обратного выдавливания наиболее опасные зоны находятся в точках А и С, т. к. они расположены на верхней границе очага пластической деформации и величина гидростатического давления в них незначительна, а накопленные деформации велики. Согласно [5, с. 16] по теории пластического течения величины относительного гидростатического давления в этих точках определяются выражениями:

$$\sigma_A = -0,367 - \frac{0,333q_{mp}}{\sigma_s}; \quad (15)$$

$$\sigma_C = \sigma_A - 1,1 \cdot \ln R,$$

где q_{mp} – относительная сила трения, действующая при выдавливании материала при температуре 700 °С; σ_s – напряжение текучести исследуемого материала при температуре 700 °С, $\sigma_s = 100$ МПа.

Максимальное значение силы трения определяется по формуле [5]

$$q_{mp} = 1,1 \cdot \sigma_s \cdot \frac{\mu \cdot R}{1 + \mu \cdot R} = 1,1 \cdot 100 \cdot \frac{0,30 \cdot 1,6}{1 + 0,30 \cdot 1,6} = 35,6. \quad (16)$$

Для исследуемого материала

$$\sigma_A = -0,367 - \frac{0,333 \cdot 35,6}{100} = -0,485; \\ \sigma_C = -0,485 - 1,1 \cdot \ln 1,6 = -1,00. \quad (17)$$

9. По диаграмме пластичности материала, полученной для температуры, при которой производится выдавливание, определяются значения относительного гидростатического давления в опасных точках и находятся величины предельно допустимых деформаций. Диаграммой пластичности называют графическое изображение зависимости предельной деформации e_p (после достижения которой начинается разрушение) от величины относительного гидростатического давления (σ/σ_s). Диаграмма пластичности дисперсно-упрочненной меди описывается формулой

$$e_p = \exp(-2,6 \cdot \sigma) / 4 + 0,085. \quad (18)$$

Согласно данным, приведенным в [7, с. 549], относительное гидростатическое давление в случае одноосного растяжения равно 0,58, при одноосном сжатии (-0,58), при кручении – 0 (т. к. реализуется чистый сдвиг, нормальное напряжение отсутствует).

Предельная деформация при одноосном растяжении определяется из выражения [7, с. 568]

$$e_p = 1,73 \cdot \ln \left(\frac{100}{100 - \psi} \right) = 1,73 \cdot \ln \left(\frac{100}{100 - 4,65} \right) = 0,085, \quad (19)$$

где ψ – относительное сужение поперечного сечения при растяжении образца при температуре 700 °С, $\psi = 4,65$ %.

Предельная деформация при одноосном сжатии при температуре 700 °С

определяется из выражения [7, с. 568]

$$e_p = 2\sqrt{3 \cdot \ln\left(\frac{d}{d_0}\right)} = 2\sqrt{3} \cdot \ln\left(\frac{30}{20}\right) = 1,4, \quad (20)$$

где d_0 – диаметр образца перед осадкой, $d_0 = 20$ мм; d – диаметр образца после осадки, $d = 30$ мм.

Предельная деформация при кручении цилиндрического образца диаметром 16 мм при температуре 700 °С определяется из выражения [7, с. 561]

$$e_p = \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} 15^\circ = 0,26. \quad (21)$$

Диаграмма пластичности исследуемого материала при температуре

700 °С представлена на рис. 4. По диаграмме пластичности для найденных величин относительного давления $\sigma_A = -0,485$ и $\sigma_C = -1,00$ определяются величины предельных накопленных деформаций в точках А и С, т. е. деформаций, при которых возможно разрушение:

$$e_{pA} = 1,15; \quad e_{pC} = 3,45. \quad (22)$$

10. Определяется рабочий ход пуансона S , при котором величина накопленной деформации в опасной зоне равна критической. Найденное значение S позволяет найти предельную глубину выдавливаемой полости за один переход по формуле

$$h_p = \frac{R^2}{R^2 - 1} \cdot S. \quad (23)$$

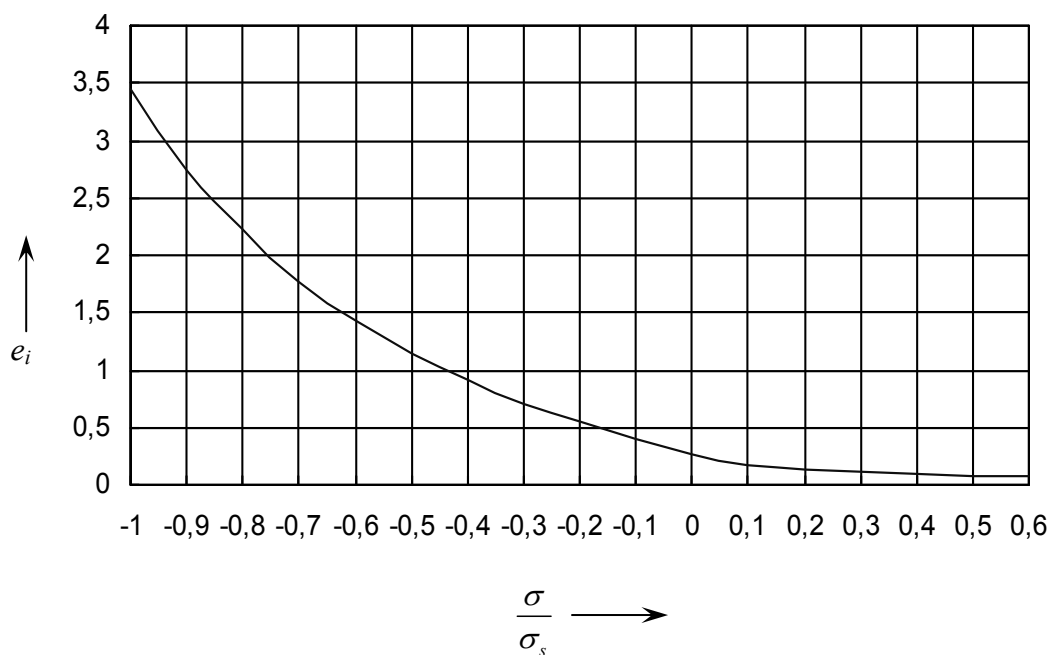


Рис. 4. Диаграмма пластичности дисперсно-упрочненной меди при температуре 700 °С:
 $\frac{\sigma}{\sigma_s}$ – относительное гидростатическое давление

Так как согласно пункту 3 рабочий ход, при котором поле деформаций в районе, примыкающем к стенке матрицы, становится стационарным, равен $S_{CT} = 0,49$ и с увеличением рабочего хода

$S \geq S_{CT}$ деформация в точке А перестает расти, принимаем величину накопленной деформации в точке А $e_{iA} = 0,56$ (пункт 4). Исходя из этого можно сделать вывод, что $e_{iA} < e_{pA} = 1,15$ и разру-

шения на наружной поверхности заготовки не произойдет.

11. Исходя из формулы для определения максимальной накопленной деформации в точке С находится значение критической величины рабочего хода S_p :

$$e_{pC} = e_{iC} = e_{iA} + 0,5 \cdot (e_{iO} + e_{iK}) = 0,56 + 0,5(0 + 2 \cdot \ln(1 + m)) = 3,1. \quad (24)$$

Откуда

$$\ln(1 + m) = 3,45 - 0,56 = 2,89; \\ m = 17,0. \quad (25)$$

Так как $m = \frac{S}{h}$, то

$$S_p = m \cdot h = 17,0 \cdot 0,63 = 10,72. \quad (26)$$

12. Рассчитывается предельная глубина выдавливаемой полости за один переход:

$$h_p = \frac{R^2}{R^2 - 1} \cdot S_p = \frac{1,6^2}{1,6^2 - 1} \cdot 10,72 = 17,57, \quad (27)$$

т. е. 175,7 мм.

При производстве изделий типа электродов контактной точечной сварки возникла потребность в создании штампов для выдавливания отверстий с максимальной глубиной 90 мм в дисперсно-упрочненной меди в заготовках с теми же геометрическими параметрами поперечного сечения. В процессе выдавливания отверстий указанной глубины, при отсутствии нарушений температурного режима, на наружной и внутренней поверхностях заготовок трещин не наблюдалось, деформационное упрочнение не отмечалось [8].

Высокая пластичность в условиях всестороннего неравномерного сжатия в совокупности с отсутствием деформационного упрочнения при неполной холодной штамповке объясняется механизмом межзеренного скольжения, характерным для материала с микрокристаллической структурой, находящегося в состоянии высокой степени наклепа, приобретенного на стадии механическо-

го легирования. Характерной структурной особенностью дисперсно-упрочненной меди является то, что микроструктура материала (размер и форма зерен) практически не изменяется в течение всего времени деформирования. Постоянной остается плотность дислокаций ρ в объеме зерен, не образуются полосы скольжения, не создаются сложные дислокационные структуры внутри зерен (диполи, петли, дислокационные стенки), не отмечается деформационное упрочнение. Это указывает на то, что не происходит пересечения дислокаций в объеме зерен и внутри зерен не работают источники Франка-Рида. Эти структурные свойства обусловлены специфическим механизмом деформации – зернограницным проскальзыванием.

Сопоставление результатов расчета накопленных деформаций, проведенных по методике А. М. Дмитриева и А. Л. Воронцова с учетом технологических особенностей дисперсно-упрочненной меди, показали высокую качественную и количественную сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Использование этой методики [3–5, 7] с учетом особенностей исследуемого материала, позволяет воспроизвести реальные закономерности процесса выдавливания изделий из заготовок из дисперсно-упрочненной меди и дает возможность установить распределение накопленных деформаций, усилие, необходимое для выдавливания, а также технологические переходы, обеспечивающие максимальное формоизменение заготовки без образования микротрещин.

Заключение

1. Характерной особенностью дисперсно-упрочненной меди, обладающей структурой микрокристаллического типа с равномерно распределенными дисперсными частицами Al_2O_3 , стабилизирующими границы зерен, является высокая пластичность наклепанного материала в условиях всестороннего неравномерного сжатия при неполной холод-

ной деформации, объясняемая межзеренным механизмом скольжения. Для указанных условий предельная глубина выдавливаемой полости за один переход составляет 17 диаметров пуансона.

2. Применение для расчетов предельной глубины выдавливания в заготовках из дисперсно-упрочненной меди основных положений теории пластического течения и методики расчета накопленных деформаций, предложенной А. М. Дмитриевым и А. Л. Воронцовым с учетом особенностей исследуемого материала, показало высокую качественную и количественную сходимость расчетных и экспериментальных данных и позволило воспроизвести реальные закономерности процесса выдавливания, установить распределение накопленных деформаций и допустимую степень деформации, обеспечивающую максимальное формоизменение заготовки без образования микротрещин. Проведенные расчеты позволяют принять обоснованные решения по выбору штамповочных переходов, прессового оборудования и обеспечения прочности штампового инструмента для выдавливания.

3. Проведенные расчеты позволили разработать технологический процесс обратного выдавливания глубоких полостей при изготовлении электродов для контактной точечной сварки и токоподводящих наконечников из дисперсно-упрочненной меди, повысить качество изделий, снизить на 20...30 % потери металла в стружку,

значительно повысить производительность процесса и улучшить эксплуатационные свойства изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Громов, Н. П.** Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – 2-е изд. – М. : Металлургия, 1978. – 360 с.
2. **Смирнов, В. С.** Сопrotивление деформации и пластичность металлов / В. С. Смирнов, А. К. Григорьев, В. П. Пакудин. – М. : Металлургия, 1975. – 271 с.
3. **Воронцов, А. Л.** Анализ начальной стадии обратного выдавливания / А. Л. Воронцов // Статическая и динамическая прочность машиностроительных конструкций : межвузов. сб. науч. тр. – М., 1986. – С. 100–104.
4. **Воронцов, А. Л.** Деформированное состояние заготовки при обратном выдавливании / А. Л. Воронцов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1982. – № 3. – С. 113–117.
5. **Дмитриев, А. М.** Определение технологических параметров выдавливания полых цилиндрических изделий : справочник / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов // Инженерный журнал. – 2002. – № 2. – С. 10–17.
6. **Тарновский, И. Я.** Контактные напряжения при пластической деформации / И. Я. Тарновский, А. Н. Леванов, М. П. Поксеваткин. – М. : Металлургиздат, 1966. – 279 с.
7. **Колмогоров, В. Л.** Механика обработки металлов давлением : учебник для вузов / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
8. **Хабибуллин, А. И.** Особенности прошивки заготовок из дисперсно-упрочненного материала на основе меди / А. И. Хабибуллин, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. науч. тр. VI науч.-техн. конф., Новополоцк, 24–26 апр. 2007 г. : в 3 т. – Новополоцк, 2007. – Т. 2. – С. 88–91.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 13.10.2009

A. I. Habibullin, G. F. Lovshenko, F. G. Lovshenko
Calculation of limiting depth of extrusion in blanks
from dispersion-reinforced copper

Features of the process of backward extrusion of extruded blanks made of dispersion-reinforced copper are considered in the article. For definition of limiting depth of extrusion the technique developed by A. M. Dmitriev and A. L. Vorontsov was used. The given technique has shown high qualitative and quantitative convergence of calculation and test data and has allowed to reproduce real laws of the process of extrusion and to make reasoned decisions for choice of press equipment.

УДК 621.791.753.0

А. И. Хабибуллин, Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, доц.,
Ф. Г. Ловшенко, д-р техн. наук, проф.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ ЗАГОТОВОК ИЗ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ МЕДИ

Рассмотрены особенности процесса деформирования экструдированных заготовок, изготовленных из дисперсно-упрочненной меди. Приведены кривые упрочнения сплавов на основе меди при растяжении при температурах 600...800 °С. Результаты испытаний позволили установить, что исследуемый материал обладает одинаковой пластичностью в рабочем интервале температур от 20 до 800 °С, а также низким деформационным упрочнением по сравнению с другими медными сплавами.

Введение

Дисперсно-упрочненная медь (ДУМ), получаемая по технологии, разработанной в Белорусско-Российском университете, имеет следующие физико-механические свойства: электропроводность составляет 65...70 % от электропроводности меди, твердость – 190...220 НВ, предел прочности при растяжении – 700...900 МПа, длительная прочность – $[\sigma_{100}^{500}] = 200...250$ МПа, температура рекристаллизации – 800...850 °С, относительное удлинение – 5 %.

Эти свойства позволяют использовать ее в качестве жаропрочного материала, обладающего высокими значениями электропроводности. Изделия электротехнической промышленности (скользящие и коммутирующие электроконтакты, электроды контактной точечной сварки, токоподводящие наконечники для сварки проволокой в среде защитных газов, сопла плазмотронов и пр.), изготовленные из этого материала, отличаются высокими эксплуатационными характеристиками.

Технология изготовления ДУМ относится к высоким технологиям, так как позволяет получать электротехнические материалы с уникальным комплексом свойств (высокими твердостью и прочностью, горячей твердостью и жаропрочностью, износостойкостью и электроэрозионной стойкостью, при низкой склонности к динамическому и стати-

ческому свариванию и сохранении высоких значений электро- и теплопроводности), используя недефицитные материалы. Важными преимуществами этого метода являются простота технологии получения материала, невысокие энергозатраты при достаточной производительности процесса. Массовое применение электротехнических изделий, изготовленных из ДУМ, сдерживается нерешенностью ряда задач, обусловленных новизной и сложностью проблемы. К одной из них относится отсутствие технологии обработки давлением.

Пластичность материала и сопротивление деформации являются основными характеристиками, обуславливающими возможность обработки давлением и его технологичность. В связи с тем, что не существует единых общепризнанных методов оценки и определения пластичности [1, 2] и процессы обработки металла давлением (ОМД) имеют бесчисленные сочетания типоразмеров заготовок и оснастки, скоростей деформации и пр., в данном исследовании использовались показатели, устанавливаемые при простых схемах нагружения (сужение шейки и относительное удлинение), и технологические (критическое обжатие при прокатке). Несмотря на то, что простые показатели не выражаются в соответствующих величинах и определяются при схемах напряженного состояния, которые не встречаются в реальных процессах

ОМД, эти показатели позволяют установить температурный интервал максимальной пластичности и дают качественную оценку предельных степеней деформации при ОМД.

Показатели технологической пластичности, полученные моделированием основной схемы напряженного состояния без учета условий геометрического и физического подобия, могут быть использованы для качественной оценки предельных деформационных возможностей материала в соответствующем процессе ОМД.

Целью данного исследования являлось установление технологических особенностей дисперсно-упрочненной меди, необходимых для разработки методов обработки ее давлением и проектирования комплекта технологической оснастки.

Методика исследования

Температурный режим деформации устанавливался на основании кривых, характеризующих зависимость пластичности от температуры и при заданной скорости деформации. Диаграммы пластичности строились по результатам испытаний образцов на растяжение. Оценка механических свойств производилась по результатам высокотемпературных статических испытаний на растяжение на машине ИР 5143–200–11 при скорости 2,0 мм/мин. За показатели пластичности принимались сужение шейки и относительное удлинение образцов. Для построения диаграмм растяжения в диапазоне температур 20...800 °С применялись пропорциональные цилиндрические образцы диаметром $d_0 = 10$ мм.

Для определения температуры конца обработки давлением производилось прессование прутков диаметром 8 мм из экструдированных заготовок диаметром 25 мм, температура предварительного нагрева заготовок изменялась в диапазоне 500...800 °С. Температура подогрева технологической оснастки составляла 500...600 °С, скорость

деформирования – 0,016 м/с. Из полученных прессованием прутков изготавливались пропорциональные разрывные образцы диаметром $d_0 = 5$ мм и определялись их физико-механические свойства.

Для установления температурного интервала максимальной пластичности и определения зоны локализации разрушения при прокатке, а также факторов, действующих на нее, использовался метод прокатки клиновидных образцов [3]. Этот метод позволяет получать широкий интервал обжатий на одном образце. Прокатку образцов осуществляли на лабораторном стане 210 на гладкой бочке. Пластичность определяли по критическому обжатию, соответствующему началу разрушения образца.

Для снижения эффекта неодинакового охлаждения толстого и тонкого концов клиновидных образцов, а также для уменьшения возможных дополнительных напряжений в образце под влиянием переменных по длине факторов b_0/h_0 клиновидность образцов была выбрана равной 1:200.

Образцы изготавливались строганием экструдированных прутков квадратного сечения 20×20 и имели размеры: $l_0 = 1000$ мм, $b_0 = 20$ мм, $h_0 = 20$ мм. При установлении критической степени обжатия исходную толщину в критическом сечении образца рассчитывали по отметкам керна, наносимым на боковые поверхности клина через 10 мм. Принятые температуры прокатки 500...800 °С с интервалом 50 град охватывали весь возможный интервал температур обработки давлением исследуемого материала. С помощью регулировок прокатного стана обеспечивали начало разрушения в одинаковых сечениях по длине образца. Это производилось с целью устранения влияния переменных по длине клина факторов b_0/h_0 на критические обжатия $\epsilon_{кр}$. При этом критическое сечение находилось в районе середины образца, для того чтобы процесс прокатки в нем можно было считать установившимся.

Результаты исследования и их обсуждение

Температура обработки давлением должна исключать явление перегрева и обеспечивать максимальную пластичность. Последнее условие выполняется при деформировании в однофазной области диаграммы состояния сплава. В связи с тем, что ДУМ не склонна к перегреву и остается многофазной вплоть до плавления, оценка ее пластичности производилась в области температур неполной холодной обработки давлением, т. к. в этом случае

имеется возможность производить пластическую деформацию при снижении сопротивления деформированию, отсутствии значительного упрочнения и в то же время без протекания процесса рекристаллизации. Результаты высокотемпературных статических испытаний на растяжение (рис. 1) позволяют заключить, что исследуемый материал обладает одинаковой пластичностью в рабочем интервале температур: относительное удлинение составляет 4,8...5,1 %, сужение поперечного сечения – 8,3...8,6 %.

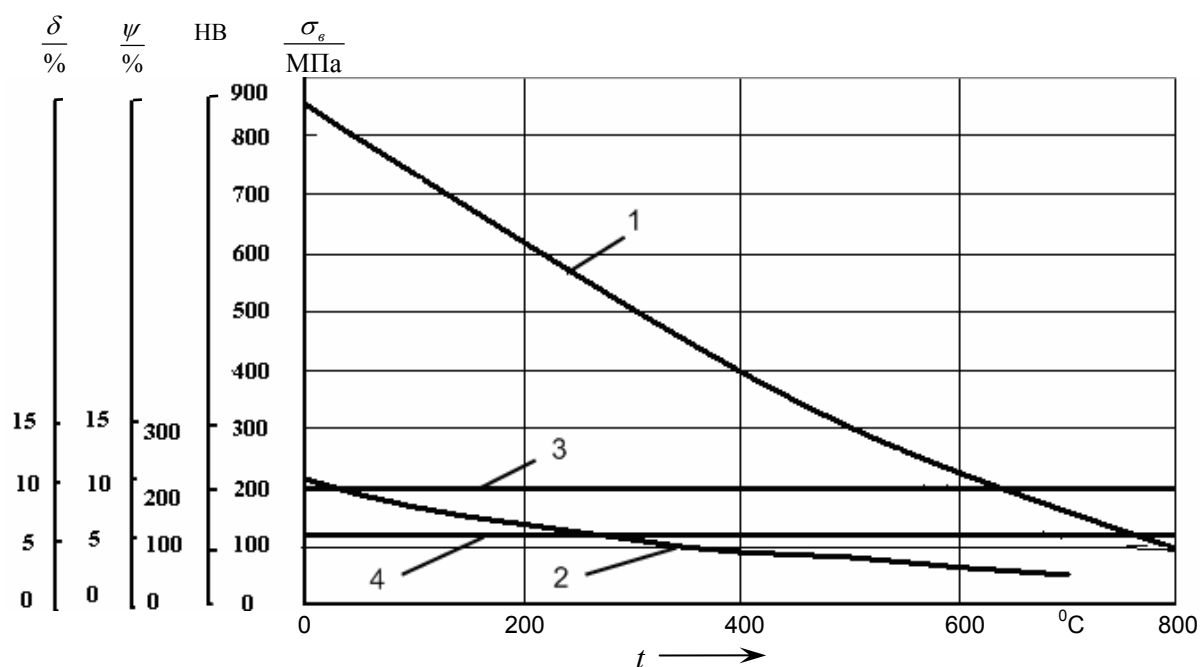


Рис. 1. Механические свойства дисперсно-упрочненной меди при высоких температурах: 1 – предел прочности; 2 – твердость; 3 – относительное удлинение; 4 – относительное сужение

Диаграммы растяжения ДУМ в диапазоне температур 20...800 °C имеют вид, характерный для хрупких материалов, не имеющих площадки текучести. Из сравнения полученных кривых упрочнения ДУМ и типовых промышленных сплавов на основе меди (рис. 2–4) [3] можно сделать нижеследующие выводы.

Сопротивление деформированию у разработанного материала значительно выше, чем у меди и типовых медных

сплавов при любых температурах. Высокая прочность, так же, как и ее пониженная пластичность, объясняется, с одной стороны, наклепом, приобретенным на стадии механического легирования, с другой стороны, микрокристаллическим типом структуры матрицы с развитой поверхностью границ зерен и субзерен. Границы представляют собой существенное препятствие для перемещения дислокаций, причем дисперсные вклю-

чения стабилизируют их до температур, достигающих $0,95 T_{пл}$, что приводит к значительному повышению горячей прочности и препятствует развитию диффузионных процессов [4, 5].

Степень упрочнения разработанного материала при температурах испытания $600...800^{\circ}\text{C}$ остается на одном уровне, около 1,03. Низкое упрочнение ДУМ, по сравнению с медью и медными сплавами, объясняется высокой сте-

пенью наклепа, приобретенного в процессе механического легирования композиции и практическим отсутствием упрочнения при дальнейшей пластической деформации. Эта особенность ДУМ объясняется тем, что накопление дислокаций у препятствий (развитых границ зерен и наноразмерных частиц Al_2O_3) подавляет деятельность источников дислокаций, в том числе и механизм размножения Франка-Рида [1].

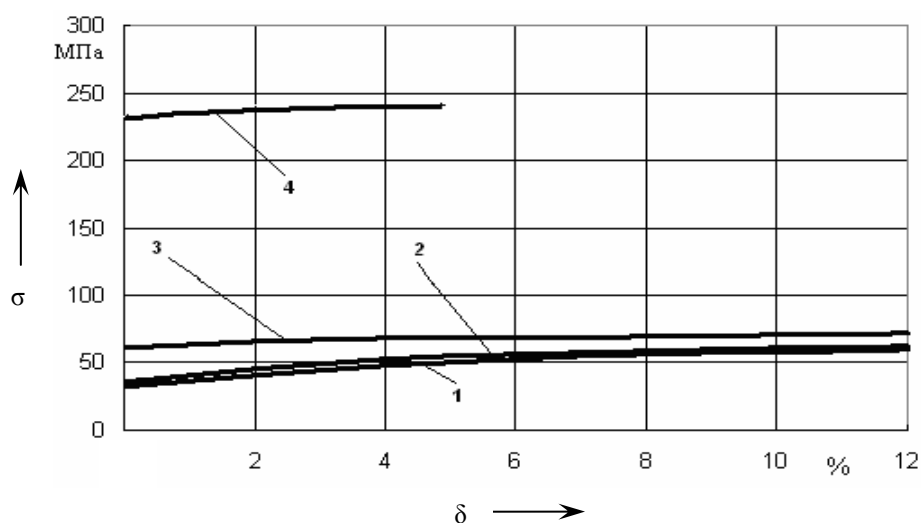


Рис. 2. Кривые упрочнения сплавов на основе меди при растяжении при температуре 600°C : 1 – медь марки М2; 2 – бронза Бр А7; 3 – бронза Бр АЖН10-4-4; 4 – дисперсно-упрочненная медь; σ – сопротивление деформации; δ – относительное удлинение

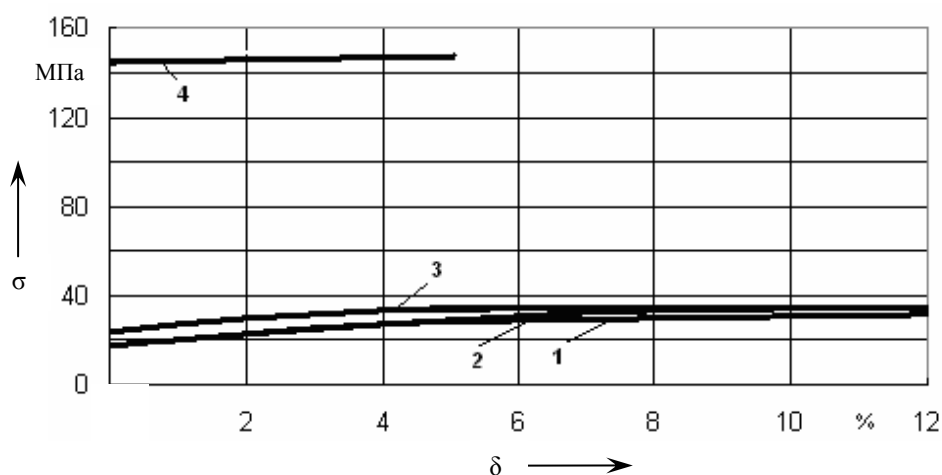


Рис. 3. Кривые упрочнения сплавов на основе меди при растяжении при температуре 700°C : 1 – медь марки М2; 2 – бронза Бр А7; 3 – бронза Бр АЖН10-4-4; 4 – дисперсно-упрочненная медь

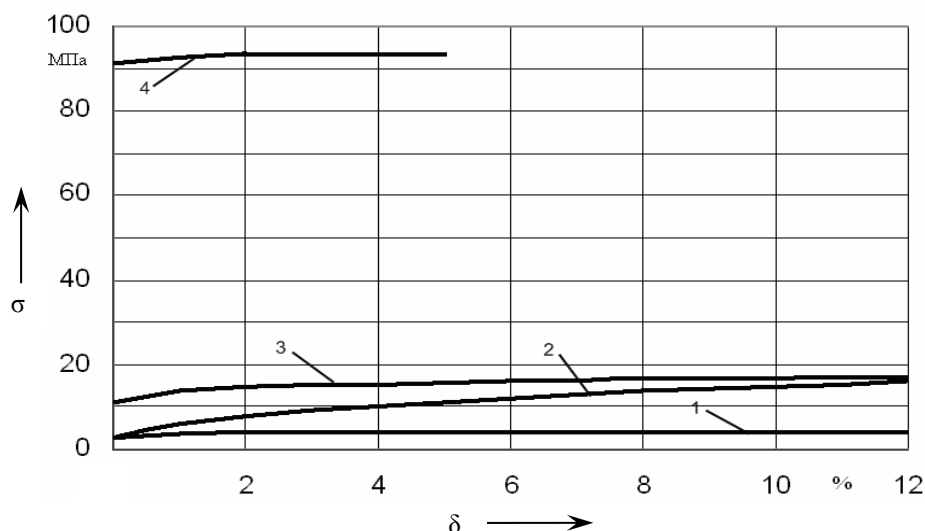


Рис. 4. Кривые упрочнения сплавов на основе меди при растяжении при температуре 800 °С: 1 – медь марки М2; 2 – бронза Бр А7; 3 – бронза Бр АЖН10-4-4; 4 – дисперсно-упрочненная медь

Одной из особенностей прутков ДУМ, получаемых экструдированием, является волокнистая макроструктура. Такое строение образуется в результате специфического деформирования гранул. Оксидные пленки на поверхности гранул в процессе экструдирования вытягиваются вместе с зернами в направлении деформации. Так как эти включения при нагревании не растворяются, они (или продукты их разрушения) сохраняют вытянутую форму и придают макроструктуре волокнистое строение, которое не устраняется до температуры 0,95 $T_{пл}$. Вышеперечисленные особенности существенно влияют на процесс обработки давлением.

Следующим этапом исследований являлось установление температурного интервала обработки давлением. В связи с тем, что признаки начала рекристаллизации ДУМ отмечаются при температурах нагрева свыше 800 °С [4, 5], это значение было принято за температуру начала обработки давлением. Для определения температуры конца обработки устанавливалась зависимость физико-механических свойств материала от температуры обработки давлением. Для решения этой задачи производилась операция прессования

прутков при различных температурах. Полученные данные (рис. 5) позволяют сделать вывод о том, что при обработке давлением ниже 600 °С происходит значительное снижение пластичности и прочности. Таким образом, для предотвращения разупрочнения вследствие рекристаллизации за температуру начала обработки давлением принимаем 800 °С, а за температуру конца обработки – 600 °С.

Для оценки предельных деформационных возможностей при прокатке проводилось моделирование конкретного процесса ОМД с соблюдением условий подобия по всем факторам, оказывающим существенное влияние на напряженное и деформированное состояние в зоне локализации разрушения. Диаграмма пластичности по результатам прокатки на клин представлена на рис. 6.

В случае обработки давлением со схемой всестороннего неравномерного сжатия в условиях неполной холодной деформации ДУМ обладает очень высокой пластичностью. В исследованиях [5, 6] было установлено, что пластичность ДУМ при выдавливании отверстий в условиях неполной холодной деформации значительно превышает пла-

стичность типовых медных сплавов, причем форма и размеры зерен остаются неизменными. Это указывает на то, что в материале с микrokристаллическим типом структуры, с размерами зерен, не

превышающих десятых долей микрометров, в указанных условиях реализуется иной механизм пластической деформации, обеспечивающий высокие технологические свойства.

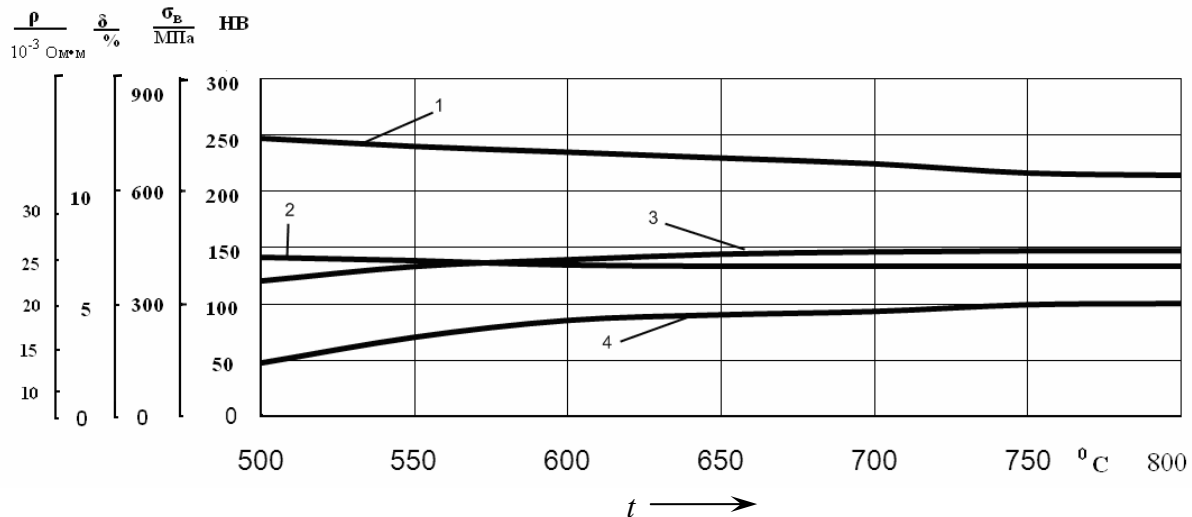


Рис. 5. Зависимость физико-механических свойств прутков от температуры прессования t : 1 – твердость; 2 – удельное электросопротивление; 3 – предел прочности; 4 – относительное удлинение

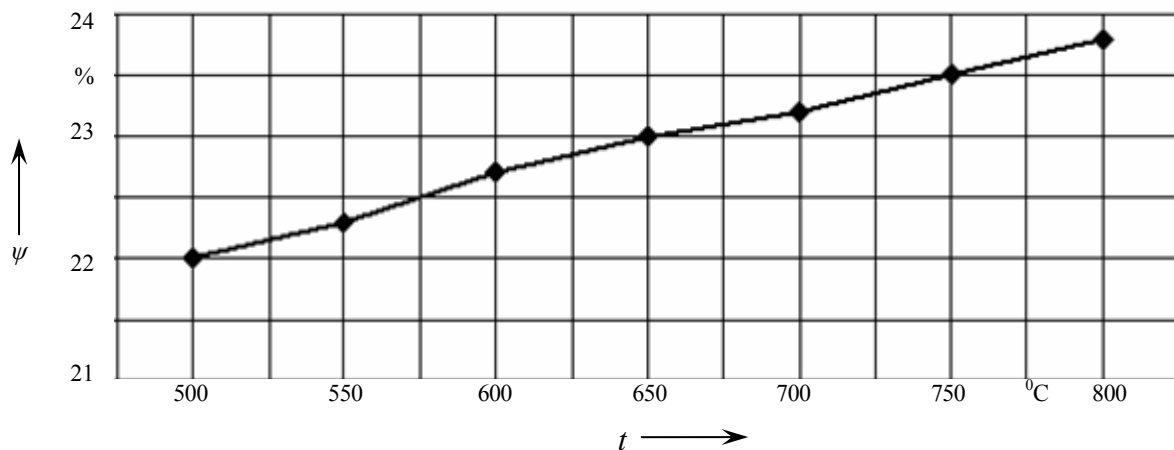


Рис. 6. Диаграмма пластичности дисперсно-упрочненной меди при прокатке клиновидных образцов: ψ – критическое обжатие; t – температура нагрева прутка

Из [1–3] известно, что основные механизмы пластической деформации при горячей обработке те же, что и при холодной: внутриверенный – скольжением и двойникованием и, кроме того, вступают в действие новые механизмы термической пластичности. Существует

три механизма термической пластичности [1–3]: аморфно-диффузионный, межзеренный и межфазовый растворно-осадительный.

В связи с тем, что обработка давлением ДУМ происходит при температурах ниже температуры рекристалли-

зации и частицы избыточной фазы при температурах обработки давлением практически не растворимы в материале матрицы, аморфно-диффузионным и межфазовым растворно-осадительным механизмами можно пренебречь.

Согласно А. А. Бочвару, для деформирования металлов и сплавов, обладающих микрокристаллической структурой (с размером зерен 1...2 мкм и менее), характерен межзеренный механизм, заключающийся в том, что при пластической деформации в процессе взаимного перемещения и поворота зерен происходит деформация границ зерен. При этом, благодаря высокой температуре (близкой к температуре рекристаллизации), происходит залечивание образовавшихся дефектов на границах между зернами. «Увеличение потенциальной энергии межзеренных прослоек и уменьшение размеров зерен в сочетании с увеличением подвижности атомов в результате нагрева приводят к облегчению межкублитной деформации (мелкие округлые зерна как бы находятся в массе сравнительно толстых межзеренных прослоек, имеющих аморфное строение, что облегчает их относительное проскальзывание и перекатывание в условиях течения, подобного течению вязкой жидкости с твердыми вкраплениями)» [2].

В связи с тем, что действие основных механизмов внутризеренных деформаций в материале, находящемся в состоянии наклепа и обладающим микрокристаллической структурой, затруднено, наибольший вклад в пластическую деформацию вносит межзеренный механизм, позволяющий значительно повысить пластичность ДУМ при реализации схемы всестороннего неравномерного сжатия. Благодаря этому в процессе выдавливания отверстий при неполной холодной деформации наблюдаются высокая пластичность, сохранение неизменных размеров и формы зерен, объясняемые межзеренным механизмом сколь-

жения, так называемым «зернограничным проскальзыванием».

Таким образом, при выдавливании отверстий в заготовках из ДУМ в условиях неполной холодной деформации реализуется эффективный механизм аккомодации зерен и «залечивания» несплошностей – зернограничное проскальзывание.

Заключение

1. Микрокристаллический тип структуры дисперсно-упрочненной меди, характеризующийся высокоразвитой поверхностью границ зерен, стабилизированных термодинамическими стабильными оксидами, препятствует развитию диффузионных процессов и, соответственно, процессов рекристаллизации, что приводит к значительному повышению горячей твердости и прочности.

2. Характерными особенностями дисперсно-упрочненной меди являются:

- волокнистая макроструктура экструдированных прутков, обуславливающая анизотропию физико-механических свойств;
- повышенное сопротивление деформации;
- постоянная пластичность при растяжении $\delta \approx 5\%$ в рабочем интервале температур 20...800 °С;
- высокая пластичность наклепанного материала в условиях всестороннего неравномерного сжатия при неполной холодной деформации;
- постоянная низкая степень упрочнения при растяжении (около 1,03) при любых температурах испытания.

3. Обработку давлением дисперсно-упрочненной меди необходимо производить в состоянии неполной холодной деформации, в узком диапазоне температур (600...800 °С), составляющем $(0,64...0,80)T_{пл}$ основы.

4. Подтверждается универсальность гипотезы А. А. Бочвара о возможности реализации межзеренного механизма пла-

стической деформации при обработке давлением металлов и сплавов, обладающих микроструктурной структурой, в том числе и дисперсно-упрочненных конструкционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
2. **Губкин, С. И.** Пластическая деформация металлов : в 3 т. / С. И. Губкин. – М. : Металлургиздат, 1960. – Т. 1. – 376 с.
3. **Полухин, П. И.** Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.
4. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 264 с.
5. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 680 с.
6. **Хабибуллин, А. И.** Особенности прошивки заготовок из дисперсно-упрочненного материала на основе меди / А. И. Хабибуллин, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. науч. тр. VI науч.-техн. конф., Новополоцк, 24–26 апр. 2007 г. : в 3 т. – Новополоцк, 2007. – Т. 2. – С. 88–91.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 13.10.2009

A. I. Habibullin, G. F. Lovshenko, F. G. Lovshenko Technological features of pressure processing of blanks from dispersion-reinforced copper

Features of the process of deformation of extruded blanks made of dispersion-reinforced copper are considered in the article. Curves of strengthening of alloys on the basis of copper at stretching at temperatures 600...800 °C are given in the article. The results of tests made it possible to establish that the tested material possesses identical plasticity in a working interval of temperatures from 20 to 800 °C, and has low strain hardening in comparison with other copper alloys.

УДК 621.791.3

Ю. А. Цумарев, канд. техн. наук, доц., В. П. Куликов, д-р техн. наук, проф.,
Т. С. Латун, А. А. Радченко, канд. техн. наук

МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

В статье рассмотрена проблема корректной оценки механических характеристик паяных соединений при статических и динамических испытаниях. Показано, что при определении статической прочности паяных соединений стыкового типа необходимо пользоваться истинной диаграммой растяжения, а для количественной оценки эффекта контактного упрочнения мягкой прослойки паяного шва применять истинное сопротивление разрыву. Предложена конструкция образца для определения циклической прочности паяных соединений методом изгиба с вращением, обеспечивающая возможность исследования влияния остаточных напряжений на результаты испытаний и снижение расхода дорогостоящих цветных металлов на их изготовление.

Важнейшим направлением совершенствования процессов пайки является повышение характеристик работоспособности паяных соединений, что, в свою очередь, требует совершенствования методик их испытания.

Основными конструктивными типами паяных соединений при капиллярной пайке являются стыковое и нахлесточное [1]. Г. А. Николаев [2] отмечал, что паяные соединения встык, несмотря на наличие «мягкой прослойки», обладают значительным потенциалом для применения их в паяных изделиях. Стыковые паяные соединения во многих случаях менее прочны, чем основной материал, что обусловлено меньшей прочностью металла паяного шва. В изделиях, подвергающихся после пайки изгибу или штамповке, а также работающих при больших статических нагрузках, воспринимающих динамические нагрузки, стыковые паяные швы не рекомендуются и редко применяются в практике пайки. Однако они являются важными элементами других разновидностей паяных соединений, которые находят гораздо более широкое применение. К ним относятся соединения с накладками, стыковые соединения ступенчатого и гребенчатого типов [1, 3].

Стыковые паяные соединения работают под нагрузкой аналогично сварным

с мягкой прослойкой [4]. Особенности напряженного состояния таких соединений при работе под нагрузкой обусловлены различием в механических свойствах основного металла и мягкой прослойки материала паяного шва. Прослойка припоя имеет предел текучести и модуль упругости меньший, чем у паемого конструкционного материала. При работе такого соединения под нагрузкой материал прослойки испытывает упрочнение и его прочностные характеристики заметно повышаются. Из-за различия в модулях упругости в процессе осевого деформирования диаметр прослойки уменьшается в большей мере, чем диаметр соединяемых стержней. Поэтому прослойка испытывает растяжение со стороны основного металла как в радиальном, так и в окружном направлениях. Таким образом, при испытании стыкового паяного соединения в материале прослойки реализуется трехосное растяжение, характеризуемое составляющими σ_z , σ_r и σ_t . В результате этого повышается предел текучести и понижается пластичность материала прослойки. Согласно одной из аппроксимаций [1] предел прочности таких соединений определяется следующим образом (рис. 1):

$$\sigma_z = \sigma_T^M \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{\delta_{np}} \right), \quad (1)$$

где σ_T^M – предел текучести материала прослойки при свободном одноосном его растяжении; R – радиус стержня; δ_{np} – толщина мягкой прослойки.

При малых толщинах прослойки, характерных для капиллярной пайки, результаты расчетов по формуле (1) плохо согласуются с экспериментальными данными. Например, при толщине прослойки $\delta_{np} = 0,08$ мм и радиусе стержня $R = 6$ мм прочность стыкового паяного соединения должна в 15 раз превышать предел текучести материала прослойки. На практике наблюдается гораздо мень-

шая степень упрочнения и пределы прочности стыковых паяных соединений превышают предел прочности используемых припоев в 2,5...3 раза [1]. По-видимому, из-за плохой сходимости расчетных результатов с экспериментальными данными авторы [5] при построении зависимости осевых напряжений разрушения от относительной толщины прослойки $\chi = \frac{\delta_{np}}{R}$ в области тонких прослоек аппроксимируют соответствующую кривую отрезком горизонтальной прямой (рис. 2).

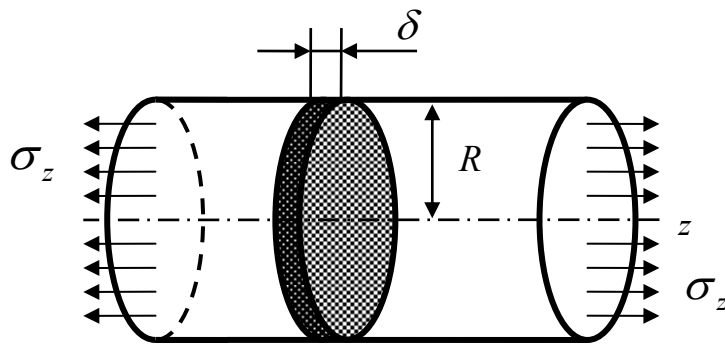


Рис. 1. Схема испытания на растяжение стыкового паяного соединения с мягкой прослойкой

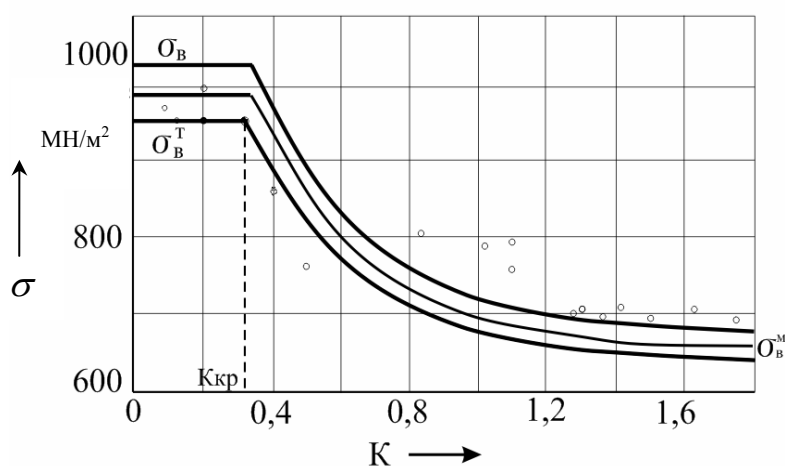


Рис. 2. Зависимость средних осевых напряжений разрушения от относительной толщины прослойки (по данным [5])

Все это указывает на наличие существенных противоречий в оценке несущей способности паяных соединений стыкового типа, а также на необходимость новых подходов к этой проблеме.

Для правильной оценки материала необходимо ясно понимать, что обычно измеряемые и используемые для оценки работоспособности паяных соединений механические свойства (временное сопротивление, относительное удлинение и сужение) определяются в пластической области при напряженном состоянии, которое часто не поддается строгому количественному подсчету. До сих пор при анализе процессов разрушения паяных соединений принимают временное сопротивление $\sigma_{\text{вр}}$ и относительное удлинение δ за основные важнейшие механические свойства. Однако это справедливо только для малопластичных металлов, у которых максимальная нагрузка отражает сопротивление разрушению, а удлинение – максимальную деформацию, выдерживаемую материалом до разрушения. Что же касается пластичных металлов, играющих наиболее важную роль в технике, то для них максимальное условное напряжение, с одной стороны, и максимальное истинное напряжение, с другой, достигаются в различные моменты деформации и поэтому величина $\sigma_{\text{вр}}$ характеризует у этих материалов некоторую среднюю ординату диаграммы истинных напряжений. Это в полной мере относится и к подавляющему большинству припоев.

По нашему мнению, при анализе процессов, имеющих место в случаях растяжения стыковых паяных соединений, недостаточное внимание уделено явлению образования шейки на стандартных образцах, подвергшихся испытанию для определения предела прочности. Как известно, пределом прочности материала при растяжении или временным сопротивлением $\sigma_{\text{вр}}$ называют отношение максимального усилия, ко-

торое способен выдержать образец, к его начальной площади поперечного сечения [6]. Следует заметить, что $\sigma_{\text{вр}}$ не является напряжением, при котором разрушается образец. Во-первых, оно связано с нагрузкой, приложенной на стадии пластического деформирования без разрушения образца и поэтому не имеющей отношения к процессу разрушения. Во-вторых, оно не учитывает уменьшения поперечного сечения образца в процессе деформирования. Если использовать растягивающую силу в момент разрушения образца и отнести ее не к начальной площади сечения, а к фактическому сечению шейки, то получим величину S_K , называемую истинным сопротивлением разрыву и которая больше предела прочности $\sigma_{\text{вр}}$. Таким образом, предел прочности припоев, используемых для пайки стыковых соединений, является условной величиной, по которой нельзя судить о действительной прочности этих материалов при их растяжении в стесненных условиях. Для анализа рассматриваемого процесса разрушения стыкового паяного соединения и связанного с ним процесса контактного упрочнения следует использовать истинную диаграмму растяжения, которая строится с учетом уменьшения площади поперечного сечения и местного увеличения деформации испытываемого образца. Другим отличием истинной диаграммы растяжения от условной является использование истинных относительных удлинений, учитывающих непрерывно изменяющуюся длину образца и неравномерность распределения деформаций, концентрирующихся в области шейки.

Важнейшими параметрами истинной диаграммы растяжения являются истинное сопротивление разрыву S_K и истинное удлинение при разрыве ε_K , которые можно определить по результатам стандартных механических испытаний следующим образом:

$$S_K = \frac{P_D}{F_{III}}, \quad (2)$$

где P_D – величина растягивающей силы в момент разрыва; F_{III} – площадь поперечного сечения шейки после разрыва образца.

Величина F_{III} легко определяется обмером разрушенного образца, а значение растягивающей силы P_D фиксируется при проведении испытания.

Величину ε_K можно определить из условия равенства объемов материала до и после испытания по следующей формуле:

$$\varepsilon_K = \frac{F}{F_{III}} - 1. \quad (3)$$

Истинная диаграмма растяжения и истинные напряжения имеют больший физический смысл, чем условные. Выводы, сделанные на основании данных об условных напряжениях, приводят к ошибочным заключениям.

По нашему мнению, работа мягкой прослойки паяного стыкового шва ничем не отличается от хорошо изученной работы растягиваемого образца, снабженного выточкой [7]. Максимальная нагрузка у таких образцов ввиду малой деформации и малой изменяемости поперечного сечения (так же, как у стыковых паяных соединений) практически отвечает моменту разрушения, которому соответствует истинное напряжение, большее, чем σ_{ep} . Таким образом, выточка (надрез) у пластичных металлов препятствует образованию шейки и понижению нагрузки за счет снижения площади поперечного сечения, характерного для гладких образцов. Поэтому для пластичных металлов следует сопоставлять прочность надрезанного образца не с временным сопротивлением σ_{ep} , а с истинным сопротивлением разрыву S_K [7]. Аналогичным образом и прочность стыкового паяного соединения, при растяжении которого шейка также не образуется, должна сравни-

ваться с величиной S_K .

Таким образом, для количественной оценки упрочнения стыковых соединений с мягкой прослойкой при малой ее относительной толщине χ следует использовать истинное сопротивление разрыву S_K для оценки прочности соединений такого типа.

Сопоставление данных по прочности гладких и надрезанных образцов показывает, что в ряде случаев, например, для круговых надрезов глубиной 1 мм, прочность надрезанного образца близка к величине S_K гладкого образца. Для образцов с большей глубиной надреза и большим радиусом в вершине надрезанный образец может быть прочнее гладкого даже при сопоставлении по параметру S_K [7]. Например, для стали 40ХН2МА при глубине кругового надреза 2 мм и радиусе при вершине надреза величиной 0,5 мм отношение $\frac{\sigma_{вн}}{S_K} = 1,1$

[7]. Иными словами, в этом случае среднее напряжение у надрезанного образца на 10 % превышает величину S_K гладкого образца. Такое превышение, вероятно, объясняется влиянием объемного напряженного состояния в средних зонах надрезанного образца.

Представляют интерес данные о влиянии формы образцов на результаты механических испытаний, опубликованные в [8]. Согласно этим данным, различные разновидности концентраторов напряжений, имеющих у испытываемых образцов, повышают характеристики прочности низкоуглеродистой стали. Однако наибольшее упрочнение обеспечивает именно выточка шириной 0,4 мм диаметром 10 мм, выполненная в центральной части образца диаметром 18 мм. При этом условный предел прочности повышается с 400 МПа (гладкий образец диаметром 10 мм) до 640 МПа (у образца с выточкой). Одновременно отмечается снижение показателей пластичности. Например, относи-

тельное сужение уменьшается с 69 % у гладкого образца до 22 %, характерных для образца с выточкой.

Следует отметить, что в литературных источниках отсутствуют данные, необходимые для оценки упрочнения припоев в области малых значений параметра χ . По нашему мнению, это обусловлено тем, что действующие стандарты, например ГОСТ 21930-76 *Припой оловянно-свинцовые* не требуют определения истинного сопротивления разрыву при проведении механических испытаний припоев. Это не позволяет выполнять рациональное конструирование паяных соединений стыкового типа и тем самым ограничивает их применение в промышленности, препятствует развитию пайки.

Проведенные нами механические испытания припоя ПОС 40 показали, что у оловянно-свинцовых припоев отсутствует физическое упрочнение, обусловленное наклепом, а относительное сужение достигает 100 %. Это затрудняет определение величины S_K . Результаты этих испытаний не подтвердили альтернативного разделения роли касательных и нормальных напряжений и показали наличие двух стадий процесса разрушения:

1) подготовительная (повреждаемость), вызванная главным образом касательными напряжениями;

2) потеря устойчивости (лавинное разрушение), вызванная в основном растягивающими напряжениями.

В процессе эксплуатации паяные соединения часто подвергаются воздействию переменных нагрузок, поэтому циклическая прочность является важной характеристикой их работоспособности. Однако работоспособность паяных соединений при циклическом нагружении исследована недостаточно полно и приведенные результаты далеко не всегда корректны.

Все вопросы, связанные с проведением экспериментальных исследований циклической прочности паяных соедине-

ний, регламентируются ГОСТ 26446-85 [9]. Характерным примером испытаний, проведенных в полном соответствии с этим стандартом, являются испытания паяных нахлесточных соединений, в которых использована схема плоского консольного изгиба, рекомендуемая ГОСТ 26446-85 [9]. При этом авторы [10] установили, что во всех случаях, независимо от величины нахлестки, размеров галтелей, температуры испытания и величины напряжений, трещины образуются в галтелях швов. Такие результаты испытаний заставляют задуматься о методической корректности проведенного исследования. Ведь при испытаниях других видов (например, на статическое растяжение) и температура испытания, и размеры галтелей, и, тем более, величина нахлестки или рабочее напряжение самым заметным и даже решающим образом влияют на окончательный результат. В этой связи необходимо подробно рассмотреть особенности напряженного состояния при изгибе нахлесточного пластинчатого образца, схема нагружения которого показана на рис. 3.

Максимальное нормальное напряжение в области нахлестки на участке между плоскостями S_1 и S_2 [5] определяется по формуле

$$\sigma_1^{\max} = \frac{M_1}{W_1} = \frac{6M_1}{b(2\delta)^2}, \quad (4)$$

где M_1 – максимальный изгибающий момент в области нахлестки; W_1 – момент сопротивления сечения, $W_1 = \frac{bh^2}{6}$;

h – высота сечения в области нахлестки, $h = 2\delta$; b – ширина пластин; δ – толщина пластин.

Распределение нормальных напряжений, обозначенное как σ_1 на рис. 3, в соответствии с напряженным состоянием изгиба таково, что на поверхности образца напряжения максимальны, а в испытываемом паяном шве их величина равна нулю. Таким образом, схема нагружения, рекомендуемая ГОСТ 26446-85, не соз-

дает рабочей нагрузки в основном конструктивном элементе испытываемого паяного соединения – паяном шве и испытанию подвергается фактически основной материал. Это является серьезным ее недостатком принципиального характера. Аналогичным образом можно

определить максимальное нормальное напряжение за пределами нахлестки:

$$\sigma_2^{\max} = \frac{M_2}{W_2} = \frac{6M_2}{b\delta^2}. \quad (5)$$

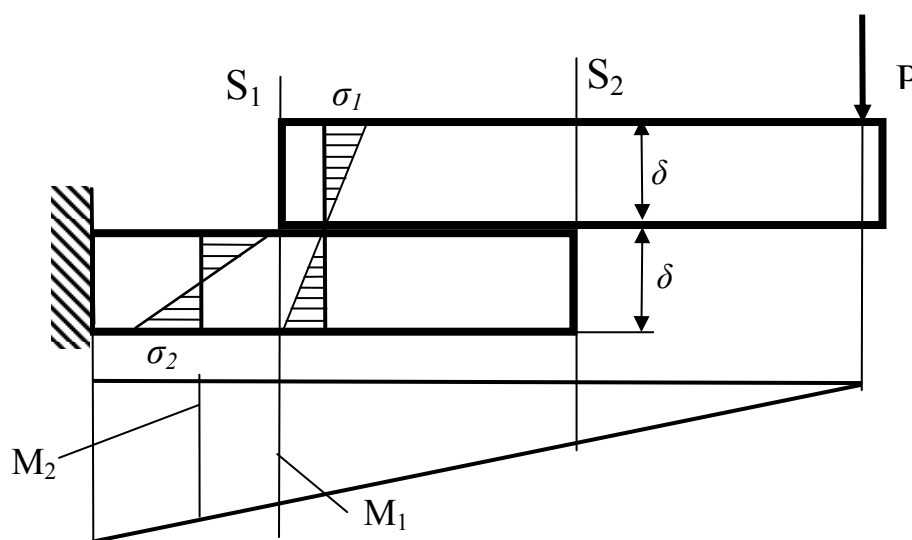


Рис. 3. Схема проведения испытаний нахлесточного паяного соединения на консольный изгиб по ГОСТ 26446-85

Поскольку изгибающие моменты M_1 и M_2 примерно одинаковы, то максимальное нормальное напряжение $\sigma_2^{\max}$, имеющее место в области галтели, более чем в 4 раза превышает значение нормальных напряжений $\sigma_1^{\max}$, действующих в области нахлестки.

Чтобы более точно оценить распределение рабочих напряжений при проведении испытаний в соответствии с ГОСТ 26446-85 и учесть влияние концентрации напряжений, обусловленной резким изменением сечения по краям нахлестки, были проведены расчеты методом конечных элементов с использованием прикладной программы COSMOS. Эти результаты показали, что распределение напряжений в реальном паяном соединении и в монолитной детали аналогичной формы и размеров, не

имеющей паяного шва, практически одинаково. Иными словами, наличие паяного шва никак не влияет на напряженное состояние образцов при нагружении их по схеме консольного изгиба (рис. 4). При этом наличие галтелей несколько смягчает распределение напряжений. Это еще раз показывает, что схема испытаний паяных нахлесточных соединений на консольный изгиб, приведенная на рис. 3 и соответствующая требованиям ГОСТ 26446-85, характеризуется весьма слабым воздействием на паяный шов испытываемого образца.

Схема нагружения и закрепления испытываемого нахлесточного паяного соединения по ГОСТ 26446-85 предопределяет возникновение и развитие усталостных трещин сначала в материале галтелей (ведь именно этот материал находится на поверхности, где нор-

мальные напряжения достигают максимальной величины) в полном соответствии с рис. 4. Изложенное показывает, что схема поперечного изгиба с консольным нагружением обладает слабой информативностью, не обеспечивает

решения задач, сформулированных в ГОСТ 26446-85, и поэтому использование этой схемы для проведения усталостных испытаний паяных соединений нахлесточного типа нельзя признать целесообразным.

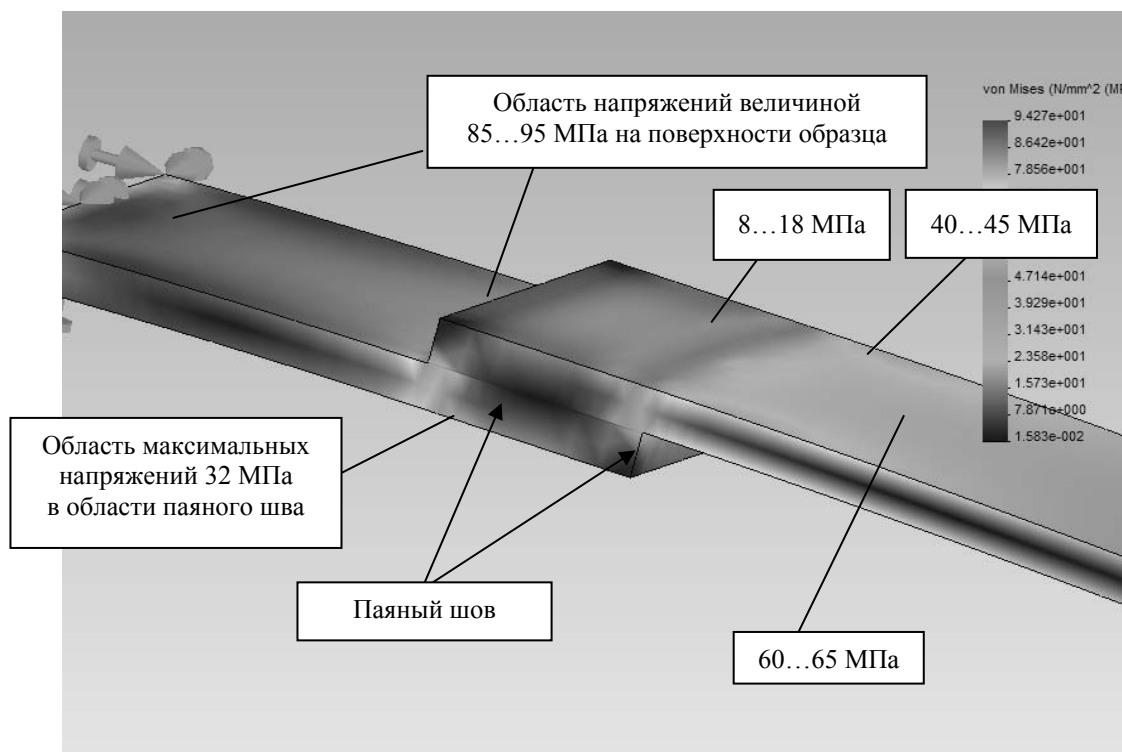


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений в паяном нахлесточном соединении при его консольном изгибе

Таким образом, необходимо воздержаться от использования схемы консольного изгиба нахлесточного соединения пластин и принять схему изгиба вращающегося образца, также предусмотренную ГОСТ 26446-85. Для этого нами была разработана конструкция образца, в которой из дорогого паяемого материала (например, меди) выполнены только небольшая вставка и стержень (рис. 5). Остальные элементы образца выполнены из стали, что позволило сократить расход дорогостоящих испытываемых цветных металлов не менее, чем на 75 %. Кроме того, в предлагаемой нами конструкции общая ось стержня и

вставки может смещаться относительно оси закрепляющих пластин на величину e (см. рис. 5). Это позволяет проводить испытания в условиях воздействия на испытываемый паяный шов не только изгибающего, но и крутящего момента. Напряжения среза от крутящего момента достигают максимума на краю паяного шва (там же максимальны и нормальные напряжения). Они также изменяются по схеме симметричного цикла, т. к. в процессе вращения крутящий момент изменяет не только свою величину, но и направление. Их величину можно определить по формуле

$$\tau = \frac{M_{кр} R}{J_n} = \frac{M_{кр}}{W_n}, \quad (6)$$

где R – радиус стержня; J_n – полярный момент инерции сечения стержня; W_n – полярный момент сопротивления сечения диска.

Окончательно максимальные касательные напряжения цикла определяются по формуле

$$\tau_{\max} = \frac{16Pe}{\pi D^3}, \quad (7)$$

где D – диаметр стержня, $D = 2R$.

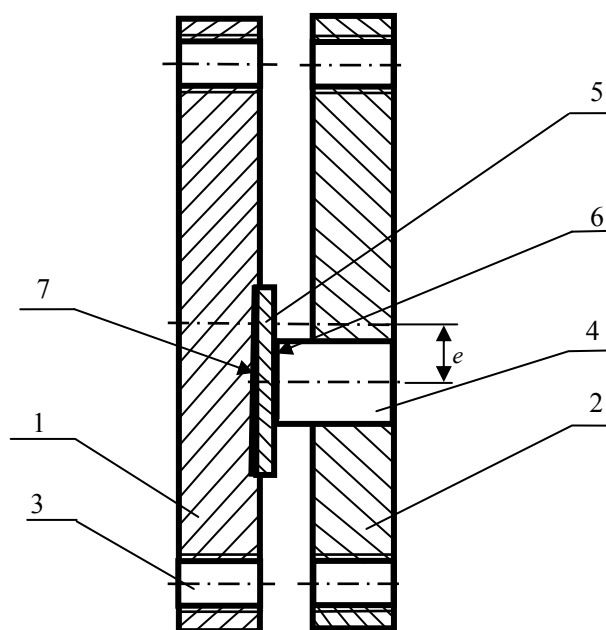


Рис. 5. Конструкция образца для испытаний на циклическую прочность, снабженного вставкой из испытываемого материала: 1, 2 – диски; 3 – крепежные отверстия; 4 – стержень из паяемого материала; 5 – вставка из паяемого материала; 6 – испытываемый паяный шов; 7 – прикрепляющий паяный шов

Различие в материалах, из которых изготавливаются пластина и различные элементы предлагаемого образца, приводит к образованию остаточных термических напряжений в нем. Эти напряжения могут оказать значительное влияние на результаты проводимых испытаний, искажая их. Поэтому нами было проведено исследование поля остаточных напряжений, обусловленных различием в коэффициентах термического расширения материалов, используемых в конструкции образца. Было установлено значительное влияние, которое оказывает толщина вставки не только на величину напряжений, но и на характер их распределения. Поэтому,

изменяя толщину вставки, можно в широких пределах регулировать напряженное состояние в испытываемом паяном шве. Это позволяет избежать искажения результатов испытаний однородных паяных соединений, обусловленных воздействием поля остаточных термических напряжений, и с успехом применять образцы данного типа в практике. При исследовании влияния, которое оказывают остаточные термические напряжения на циклическую прочность, следует применять вставки небольшой толщины порядка 1 мм и за счет этого создавать остаточные напряжения величиной до 100 МПа.

Выводы

1. Установлено, что истинное сопротивление разрыву является важной характеристикой припоев и его необходимо ввести в действующие стандарты, что обеспечит более эффективное конструирование паяных соединений стыкового типа.

2. Показано, что испытания паяных нахлесточных соединений на циклическую прочность по схеме консольного изгиба не обеспечивают достижения целей, поставленных ГОСТ 26446-85, и должны быть исключены из этого стандарта.

3. Предложена конструкция паяного образца для проведения испытаний на изгиб вращающихся образцов, отличающаяся экономичностью, высокой достоверностью получаемых данных и возможностью проведения исследований влияния остаточных термических напряжений на циклическую прочность паяных соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лашко, Н. Ф. Пайка металлов / Н. Ф. Лашко, С. В. Лашко. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.

2. Николаев, Г. А. Применение пайки в конструкциях / Г. А. Николаев // Пайка : опыт, искусство, наука : сб. докл. науч.-техн. конф. за 1967–2002 гг. : в 2 т. – М. : Альфа Доминанта, 2005. – Т. 1. – С. 17–22.

3. Гржимальский, Л. Л. Технология и оборудование пайки / Л. Л. Гржимальский, И. И. Ильевский. – М. : Машиностроение, 1979. – 240 с.

4. Николаев, Г. А. Работа мягкой прослойки паяных соединений / Г. А. Николаев, А. И. Киселев // Сварочное производство. – 1990. – № 12. – С. 3–4.

5. Бакши, О. А. Работоспособность сварных цилиндрических труб с поперечной мягкой прослойкой при осевом растяжении / О. А. Бакши, А. С. Богомолова // Сварочное производство. – 1969. – № 4. – С. 3–4.

6. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М. : Наука, 1986. – 512 с.

7. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. 2 : Механические испытания. Конструкционная прочность / Я. Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974. – 368 с.

8. Майзель, В. С. Сварные конструкции / В. С. Майзель, Д. И. Навроцкий. – М. : Машиностроение, 1973. – 302 с.

9. ГОСТ 26446-85. Соединения паяные. Методы испытаний на усталость. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 23 с.

10. Образование усталостных трещин в нахлесточных паяных соединениях / Б. Л. Груздев [и др.] // Автоматическая сварка. – 1982. – № 7. – С. 73–74.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 22.04.2009

Y. A. Tsumarev, V. P. Kulikov,
T. S. Latun, A. A. Radchenko
The estimation method of mechanical
characteristics of solder connections
at static and dynamic tests

In article the problem of a correct estimation of mechanical characteristics solder bonds at static and dynamic tests is considered. It is shown, that at definition of static capacity of solder bonds of butt type it is necessary to use the true stress-strain diagram and for a quantitative estimation of the effect of local strengthening of a soft interlayer of the solder bond to apply true tear resistance. The design of the sample for definition of cyclic strength of solder bonds by a bend-and-rotation method, providing the possibility to research the influence of residual stress on the results of tests and decrease in the expense of expensive nonferrous materials on their manufacturing has been offered.

УДК 621.9.047:669:538.8

В. М. Шеменков, Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, доц.**СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ
ОДНОКАРБИДНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ В
ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ**

В статье рассмотрены механизмы модификации структуры однокарбидных твердых сплавов типа ВК8, приводящие к повышению поверхностной твердости и износостойкости инструментов. Представлены результаты сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа.

Введение

Твердые сплавы как инструментальные материалы широко и эффективно применяются в металлообработке. Достаточно отметить, что твердосплавным инструментом снимается до 70 % всей стружки. Однако качественные изменения в металлообработке, связанные с появлением новых труднообрабатываемых материалов, применением станков с числовым программным управлением, многоцелевых станков, гибких производственных систем, повышают требования к работоспособности и надежности твердосплавного инструмента. Резервы повышения износостойкости инструментальной оснастки за счет создания новых материалов в значительной степени уже исчерпаны или связаны со значительными материальными затратами. Поэтому особое значение в настоящее время приобретают вопросы, связанные с внедрением технологических процессов модификации рабочих поверхностей инструментов.

Традиционные способы повышения стойкости, такие как поверхностная термообработка, различные диффузионные и другие химико-термические способы обработки, нанесение электролитических покрытий, наплавка и др., в ряде случаев не обеспечивают необходимой износостойкости или неприемлемы. Поэтому все большее распространение получают такие способы, как нанесение износостойких покрытий и поверхностное упрочнение изделий из

металлов и сплавов методами ионно-плазменной обработки. Эти способы обработки позволяют получать покрытия и упрочненные слои, которые служат диффузионными барьерами, уменьшают трение, износ инструмента, усилия резания и деформирования. Благодаря малой теплопроводности эти покрытия и слои защищают подложку от перегрева, снижают склонность к сварке с обрабатываемым материалом и налипанию его на инструмент. Наиболее широкое применение указанные способы получили для повышения износостойкости неперетачиваемых режущих пластин из твердых сплавов.

Одним из перспективных способов является процесс модифицирующей обработки изделий в тлеющем разряде.

Метод модифицирующей обработки изделий из металлов и сплавов в тлеющем разряде был разработан на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» Могилевского машиностроительного института в середине 80-х гг. под руководством д-ра техн. наук, проф. Виктора Ивановича Ходырева [1].

Данная модифицирующая обработка инструментальных материалов осуществляется в тлеющем разряде, возбуждаемом в среде остаточных атмосферных газов, с напряжением горения 1...5 кВ обеспечивает формирование уникальных структурно-фазовых состояний в их приповерхностных слоях, а также широкий масштаб модификации структуры. Это приводит к из-

менению макросвойств материалов и определяет эксплуатационное поведение модифицируемых изделий в условиях трибомеханического нагружения, что характерно для инструментальной оснастки.

Механизмы, приводящие к модифицирующей обработке инструментальных материалов в тлеющем разряде, сходны с процессами, протекающими при низкотемпературной ионной имплантации, с той лишь разницей, что в качестве источника ионов используется среда остаточных атмосферных газов. Вследствие чего изменение свойств поверхностных слоев твердых сплавов происходит за счет торможения бомбардирующих ионов, в результате чего повышается поверхностная твердость и износостойкость материалов.

Применение созданного процесса модификации по сравнению с существующими обеспечивает следующие преимущества: возможность получения более высокой стойкости и износостойкости, что важно для современной технологии металлообработки; сокращение общей продолжительности процесса упрочнения в результате отсутствия ряда операций – подогрева, нагрева и охлаждения изделий, предварительной термообработки, что повышает производительность процесса; большую экономичность, обусловленную отсутствием дополнительной, специально подготавливаемой рабочей среды и устройства для ее приготовления; сохранность конструктивных и геометрических размеров обрабатываемых изделий; процесс не токсичен и соответствует требованиям по защите окружающей среды [2].

Целью данной работы являлось изучение процессов, протекающих в поверхностных слоях твердосплавного инструмента, в результате обработки их в тлеющем разряде.

Методика исследования. Результаты исследования и их обсуждение

Исследование процессов модификации структуры поверхностных слоев

проводили на партии многогранных неплетачиваемых пластин из твердого сплава ВК8 в исходном состоянии и подвергнувшихся обработке, при различных энергетических характеристиках тлеющего разряда и времени обработки в нем.

Для определения поверхностной твердости применялся метод Виккерса, что обусловлено высокой твердостью исследуемых материалов.

Измерение твердости рабочей поверхности твердосплавных многогранных пластин по методу Виккерса производилось согласно требованиям методики, приведенной в [3, 4], путем вдавливания алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом при вершине между противоположными гранями 136° в образец под действием нагрузки 294,2 Н, приложенной в течение 10 с, и измерении диагоналей отпечатка, оставшегося на поверхности после снятия нагрузки.

Для установления зависимости приращения поверхностной твердости H'_{HV} пластин из твердого сплава ВК8 по Виккерсу от основных факторов процесса модифицирующей обработки в тлеющем разряде зависимость $H'_{HV} = f(V, J, T)$ была аппроксимирована полиномом второй степени, отвечающим требованию ротативности.

Проведенные исследования позволили получить ряд зависимостей, представленных на рис. 1, где показаны изменения твердости от таких параметров модифицирующей обработки, как напряжение горения тлеющего разряда V , кВ (1), плотность тока J , А/м² (2), время обработки T , мин (3).

Представленные зависимости позволяют судить о неоднозначном характере приращения твердости от указанных параметров (см. рис. 1), на что указывает наличие экстремумов на графиках зависимостей. Наибольшее влияние на приращение поверхностной твердости оказывают энергетические характеристики тлеющего разряда, такие как

напряжение горения разряда V и плотность тока J .

Для упрощения исследований энергетические параметры тлеющего разряда было предложено заменить единым параметром, характеризующим удельную мощность горения разряда

W , кВт/м², определяемую из выражения

$$W_i = J_i \cdot V_i, \quad (1)$$

где J_i – измеренная плотность тока в i -м опыте, А/м²; V_i – напряжение горения тлеющего разряда в i -м опыте, кВ.

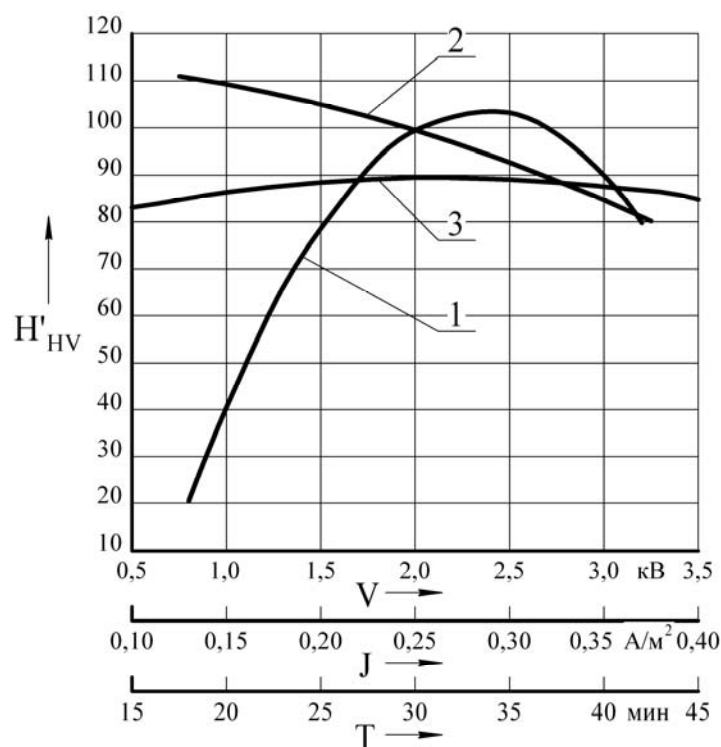


Рис. 1. Зависимость приращения поверхностной твердости H'_{HV} пластин из твердого сплава ВК8 от различных факторов модифицирующей обработки в тлеющем разряде

На основании детального анализа проведенных исследований удалось установить, что глубина модифицированного слоя h_Δ , мкм, так же, как и поверхностная твердость, в большей степени зависит от удельной мощности горения разряда W , кВт/м². Данную зависимость можно объяснить тем, что с ростом энергетической характеристики разряда растет энергия и количество налетающих на поверхности твердосплавной пластины частиц, что способствует более глубокому их проникновению и формированию более длинных каскадов смещений в кристаллических решетках фазовых составляющих сплава. Используя математический аппарат, данную

зависимость можно представить в виде степенной функции

$$h_\Delta = 250 \cdot W^{1,5}. \quad (2)$$

На рис. 2 приведены характерные результаты исследований глубины модифицированного слоя твердосплавных пластин при удельной мощности горения тлеющего разряда, соответствующие минимальному (рис. 2, б), среднему (рис. 2, в) и максимальному (рис. 2, г) значениям.

Также можно отметить то, что величина глубины модифицированного слоя для одной и той же удельной мощности горения тлеющего разряда имеет

различное значение по площади исследуемой поверхности твердосплавного образца, отличающееся от среднего в

пределах 15...30 %, что свидетельствует о нелинейности протекающих процессов во время модифицирующей обработки.

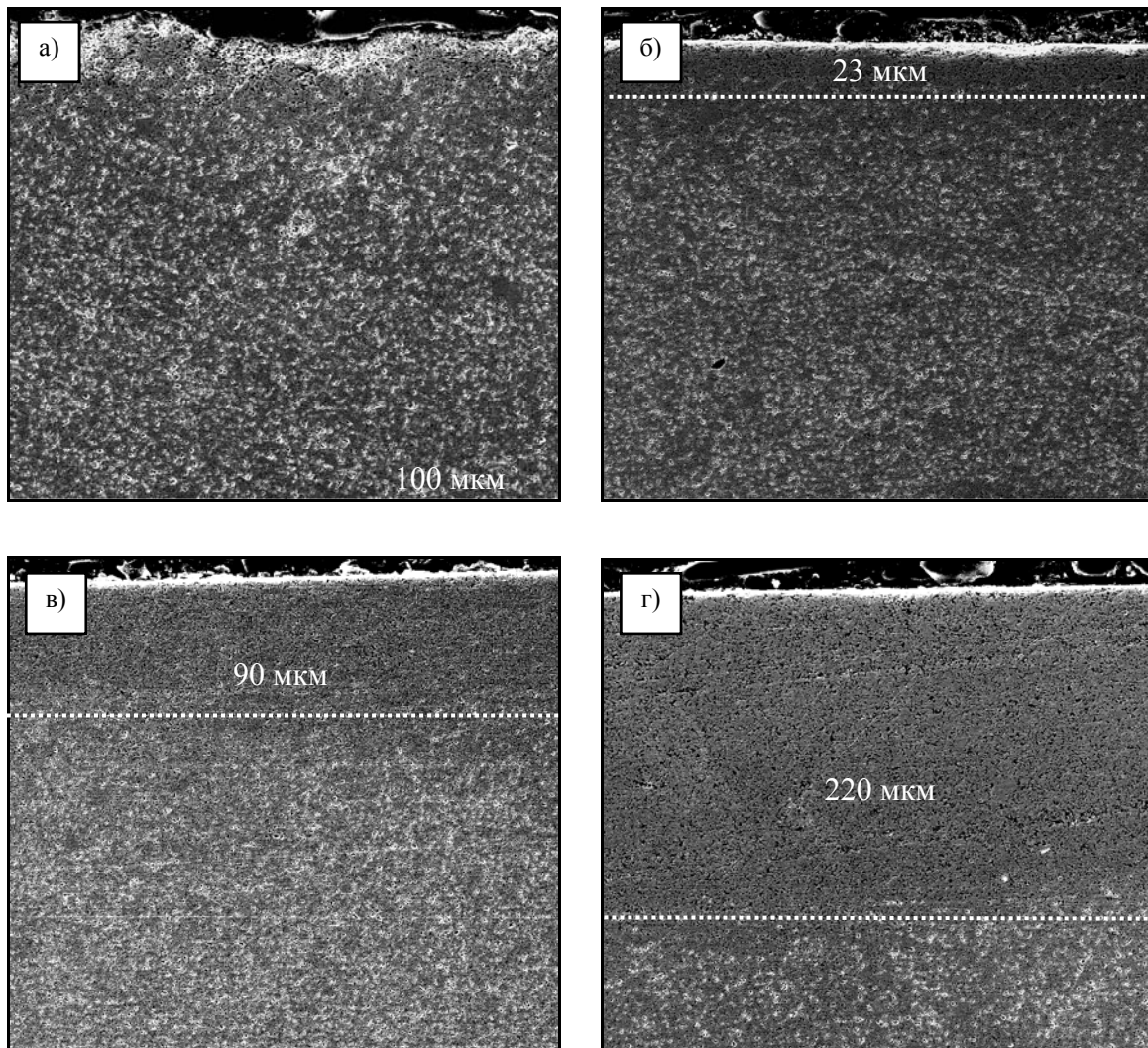


Рис. 2. Величина модифицированного слоя: а – исходное состояние; б – после обработки с удельной мощностью горения разряда 0,20 кВт/м²; в – после обработки с удельной мощностью горения разряда 0,50 кВт/м²; г – после обработки с удельной мощностью горения разряда 0,88 кВт/м²

Металлографический анализ при помощи электронной микроскопии пластин из твердого сплава ВК8 в состоянии поставки (рис. 3, а) свидетельствует о наличии в качестве твердой фазы карбида вольфрама (WC) со средней площадью фрагментов, равной 17,3 мкм², а в качестве связующего компонента выступает кобальт (Co). Границы зерен карбидной фазы являются четкими, а зерна имеют сложную форму.

При исследовании пластин, подвергнутых модифицирующей обработке в тлеющем разряде, удалось выявить ряд изменений в структуре твердого сплава.

Данные изменения связаны с уменьшением размера зерен карбидной фазы: при обработке пластин с удельной мощностью горения тлеющего разряда $W = 0,20$ кВт/м² средняя площадь зерна составляет 16,5 мкм² (рис. 3, б), при

$W = 0,50 \text{ кВт/м}^2 - 11,2 \text{ мкм}^2$ (рис. 3, в), а при значении $W = 0,88 \text{ кВт/м}^2 - 15,2 \text{ мкм}^2$ (рис. 3, г).

Помимо изменения размеров зерен карбида вольфрама было установлено, что модифицирующая обработка приводит к возникновению новых границ деления зерен твердой фазы (рис. 4), особенно после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения $0,50 \text{ кВт/м}^2$, а также к размытости меж-

фазных границ.

Данное явление можно объяснить тем, что при обработке твердосплавной пластины в тлеющем разряде с удельной мощностью горения $0,50 \text{ кВт/м}^2$ внутреннее напряжение в рамках отдельных кристаллов вследствие возникновения колебаний в кристаллической решетке приводит к образованию плоскостных дислокаций.

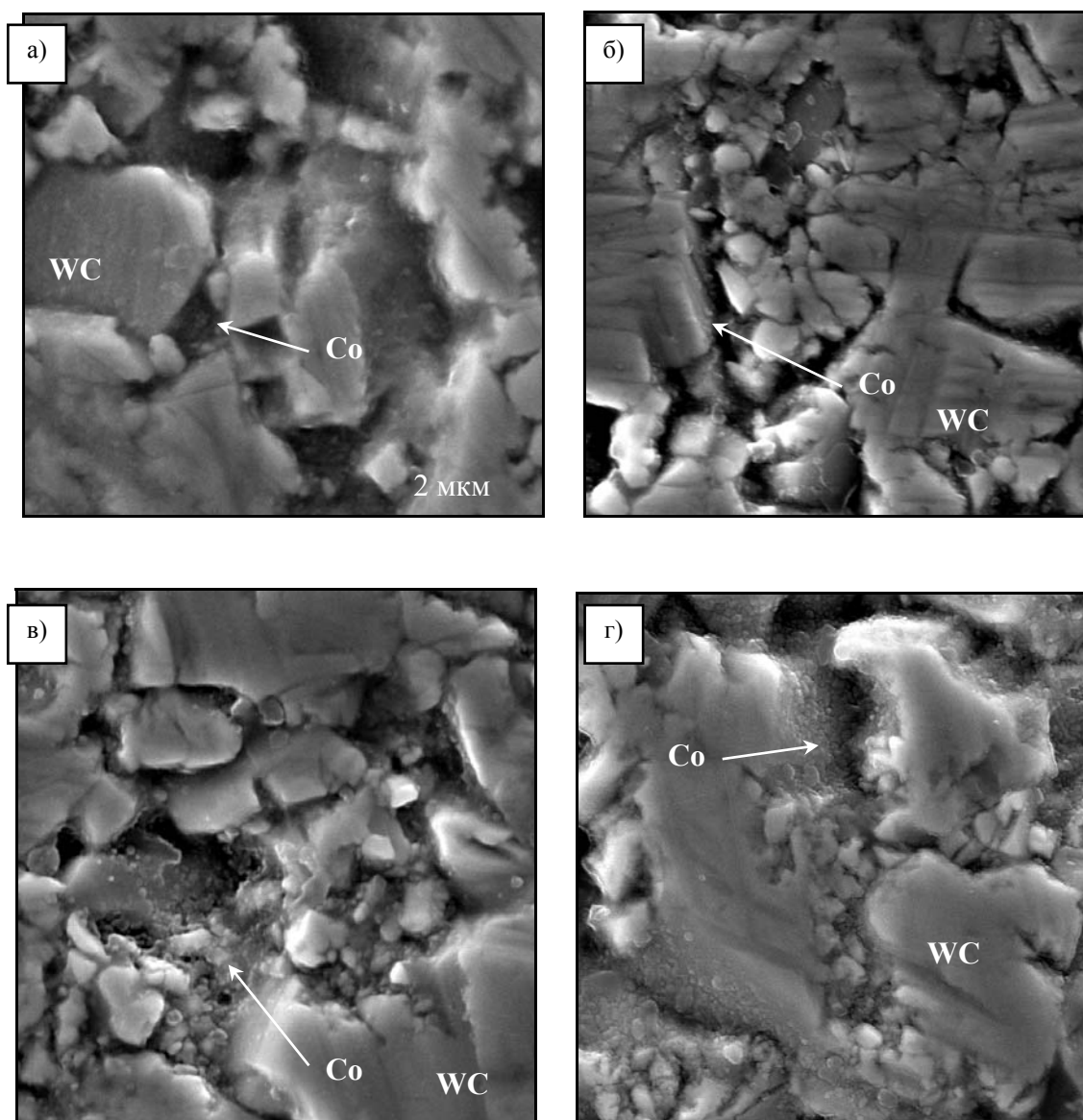


Рис. 3. Структура твердого сплава ВК8: а – исходное состояние; б – после обработки с удельной мощностью горения разряда $0,20 \text{ кВт/м}^2$; в – после обработки с удельной мощностью горения разряда $0,50 \text{ кВт/м}^2$; г – после обработки с удельной мощностью горения разряда $0,88 \text{ кВт/м}^2$

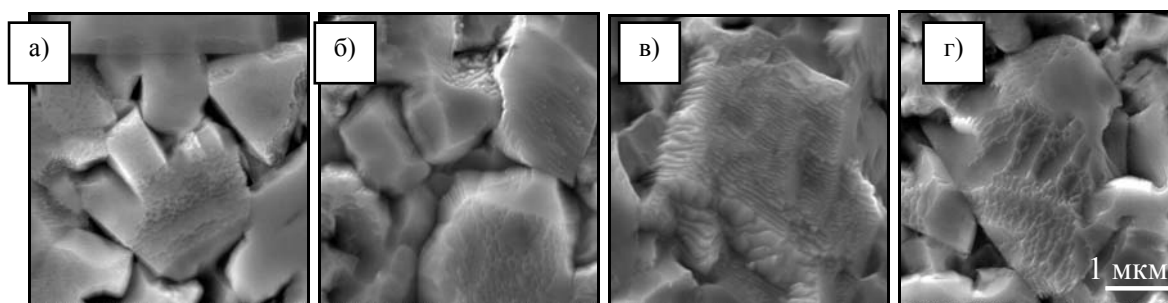


Рис. 4. Твердая фаза сплава ВК8: а – исходное состояние; б – после обработки с удельной мощностью горения разряда 0,20 кВт/м²; в – после обработки с удельной мощностью горения разряда 0,50 кВт/м²; г – после обработки с удельной мощностью горения разряда 0,88 кВт/м²

У твердосплавных пластин, обработанных с удельной мощностью горения тлеющего разряда, равной 0,20 и 0,88 кВт/м², наличия резких границ деления зерен твердой фазы не установлено.

С целью получения информации о воздействии модифицирующей обработки на структуру отдельных составляющих твердого сплава ВК8 было проведено изучение дифракционных отражений карбидов вольфрама и кобальта. Период решетки сплавов оценивали по результатам записи дифракционных линий соответствующих структурных составляющих, расположенных на дальних углах рассеяния. Размер фрагментов D связки рассчитывали методом аппроксимации по физическому уширению β исследуемых дифракционных линий Co , WC .

При определении β вводились поправки на геометрию съемки и неоднородность излучения [5]. При этом в качестве функции, определяющей распределение интенсивности в линиях эталона и исследуемого образца, выбирали функцию вида

$$f(x) = \frac{1}{(1 + \alpha x^2)^2}. \quad (3)$$

Размер D фрагментов кобальта находили из выражения

$$D = \frac{\lambda}{\beta \cdot \cos \theta}, \quad (4)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения; θ – угол рассеяния.

На рис. 5 представлен фрагмент дифрактограммы исходного образца сплава ВК8.

При анализе полученной дифрактограммы исходного образца сплава ВК8 видно, что она содержит две системы отражений, одна из которых принадлежит карбиду вольфрама WC , другая – кобальту. Межплоскостные расстояния и распределение интенсивности регистрируемых линий WC , за исключением отражения (101), соответствуют данным стандартной картотеки PDF.

Дифракционные линии, принадлежащие кобальту, характеризуются низкой интенсивностью, что связано с относительно небольшим (8 масс. %) содержанием этого элемента в исследуемом материале. Поскольку кубической и гексагональной модификациям кобальта свойственны близкие по значению межплоскостные расстояния регистрируемых линий [6], то с учетом их низкой интенсивности сделать однозначный вывод о сингонии, присутствующей в исследуемом сплаве ВК8, проблематично. Для получения информации о структуре связки сплава ВК8 был проанализирован характер изменения дифракционных параметров линии (111) кобальта и линии (112) карбида вольфрама (рис. 6).

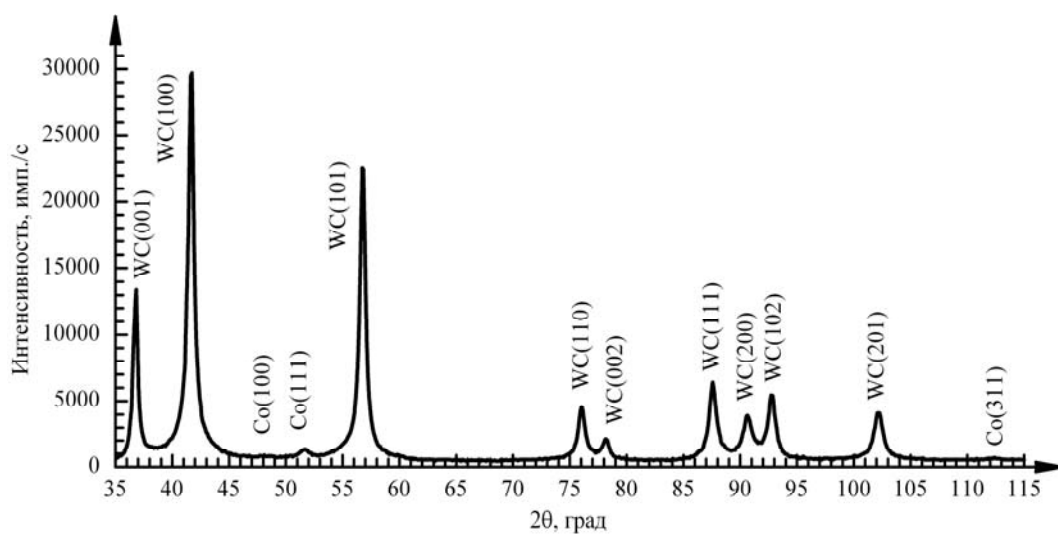


Рис. 5. Фрагмент дифрактограммы твердого сплава ВК8 в исходном состоянии

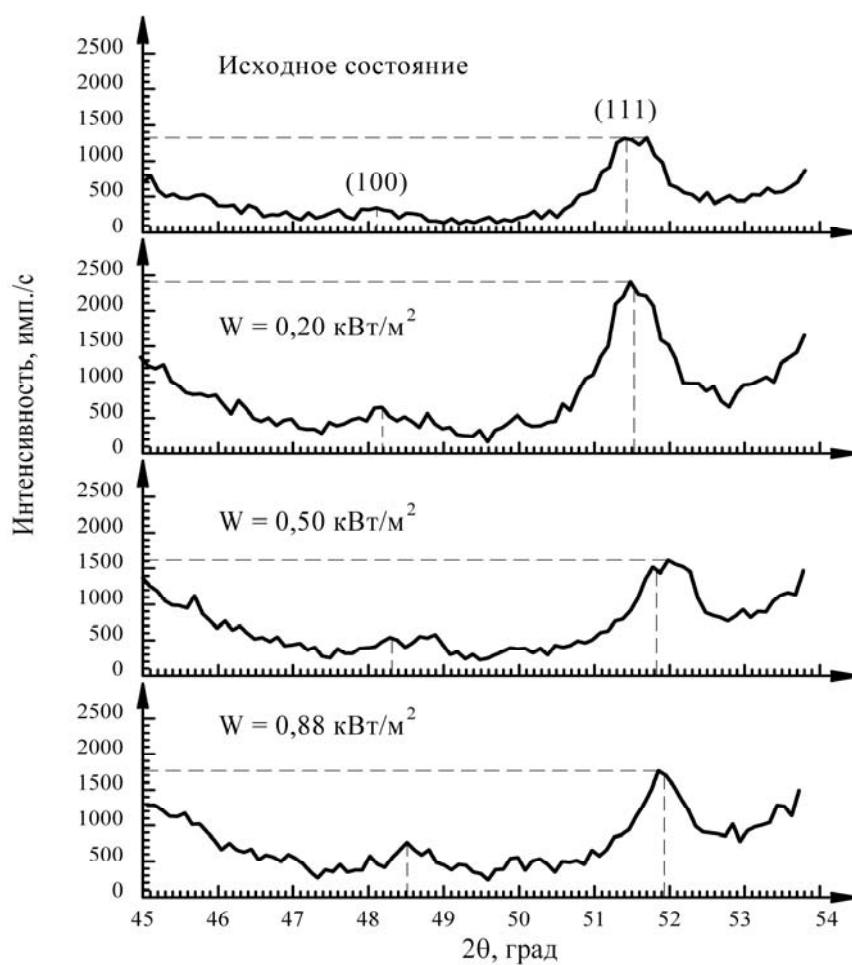


Рис. 6. Вид профиля линий (100), (111) кобальтовой связки в исходном состоянии и после модифицирующей обработки в тлеющем разряде с различной удельной мощностью горения

Из сравнения данных, представленных на рис. 6, следует, что профиль линии (111) неоднороден, что особенно характерно для исходного образца и образца, обработанного разрядом с удельной мощностью горения $0,50 \text{ кВт/м}^2$. Можно полагать, что он представляет собой наложение двух профилей отражений – линий (111) кубической и гек-

сагональной сингонии кобальта. Судя по регистрируемым угловым положениям линии (111) исходного образца, можно полагать, что найденное межплоскостное расстояние линии (111), равное $0,2064 \text{ нм}$, соответствует кобальту с кубической решеткой K12 типа Fm3m, а $d/n = 0,2053 \text{ нм}$ – гексагональной Г12 типа P64/mmc (рис. 7).

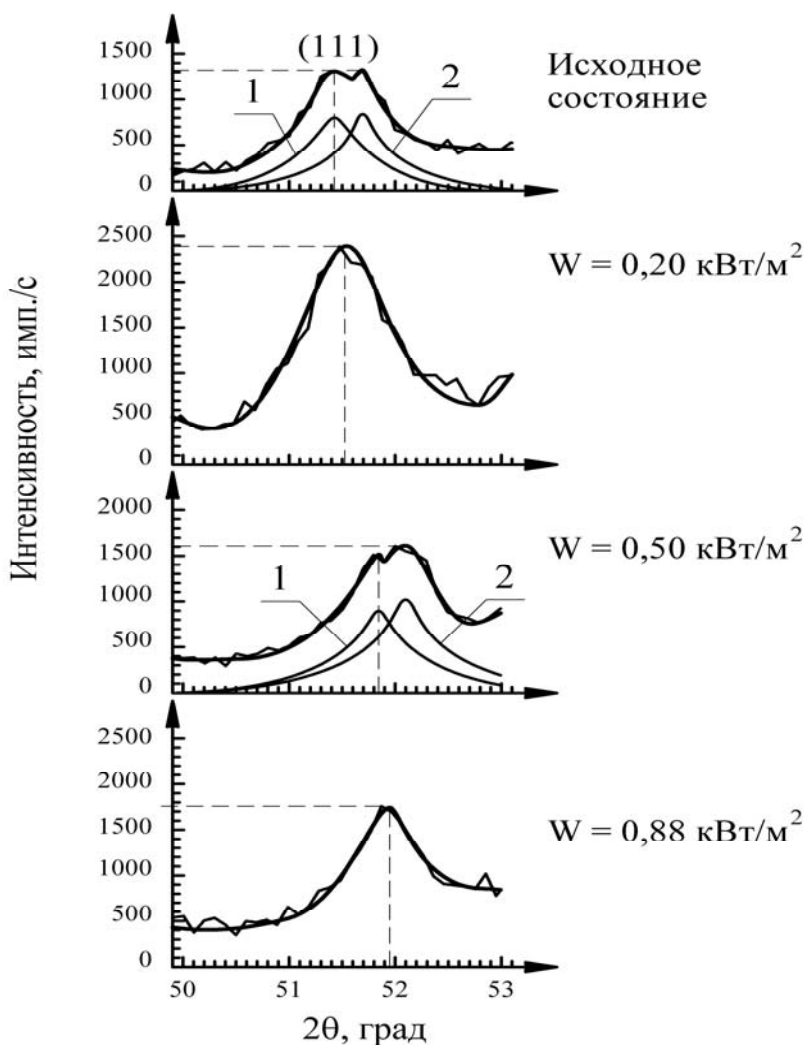


Рис. 7. Разложение профиля отражения линии (111) кобальта на кубическую и гексагональную сингонии: 1 – отражение кубической решетки K12; 2 – отражение гексагональной решетки Г12

Для исходного состояния отмечается также достаточно большая размытость профиля – величина β в этом случае достигает наибольшего значения. Отметим, что межплоскостное расстояние d/n линии (111) обеих модификаций

кобальта заметно превышает табличное значение. Период решетки кубической сингонии кобальтовой связи в исходном состоянии равен $a = 0,3579 \text{ нм}$.

Обработка исходного образца в тлеющем разряде с удельной мощностью

горения $0,20 \text{ кВт/м}^2$ приводит, с одной стороны, к некоторому сужению профиля линии (111), о чем свидетельствует уменьшение физического уширения до $\beta = 16,5 \cdot 10^{-3}$ рад, с другой, к смещению ее углового положения в сторону больших углов рассеяния 2θ . Как следствие, регистрируется снижение d/n линий (111) и уменьшение периода решетки до $0,3577 \text{ нм}$. Кроме того, профиль линии в этом случае достаточно симметричен относительно максимального углового положения линии (111).

Заметная неоднородность профиля линии вновь регистрируется для образца, прошедшего обработку в разряде с удельной мощностью горения $0,50 \text{ кВт/м}^2$. В этом случае среднее значение d/n составляет $0,2042 \text{ нм}$, для кубической модификации – $0,2049 \text{ нм}$. Для гексагонального кобальта $d/n = 0,2036 \text{ нм}$ и практически соответствует ее табличному значению [6], равному $0,2037 \text{ нм}$, что непосредственно следует из резкого смещения углового положения линии (111) в сторону больших углов рассеяния в случае образца, обработанного в тлеющем разряде с удельной мощностью горения $0,50 \text{ кВт/м}^2$. При этом значение постоянной решетки составляет $0,3556 \text{ нм}$, величина $\beta = 17,3 \cdot 10^{-3}$.

Что же касается образца, обработанного в тлеющем разряде с удельной мощностью горения $0,88 \text{ кВт/м}^2$, то энергия воздействующего на него тлеющего разряда приводит к заметному изменению профиля линии (111), здесь он достаточно симметричен, d/n составляет $2,0420 \text{ нм}$, что соответствует кубической сингонии кобальта [6]. Уширение профиля линии в этом случае наименьшее – β уменьшается до $11,6 \cdot 10^{-3}$ рад. Этот эффект позволяет сделать заключение о снижении искажений кристаллической решетки кобальта под воздействием тлеющего разряда и превращении его гексагональной сингонии в кубическую (или ее преимущественном наличии).

Как следует из проведенных оценок, размер фрагментов кобальтовой связки в приповерхностных слоях во всех случаях соответствует наноуровню. Наименьший размер (10 нм) фрагментов имеет место в исходном состоянии ВК8, наибольший (17 нм) – в случае обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения $0,88 \text{ кВт/м}^2$, промежуточное значение (12 нм) соответствует образцам, обработанным в тлеющем разряде с удельными мощностями горения с энергиями $0,20$ и $0,50 \text{ кВт/м}^2$.

Как следует из выполненного анализа профиля линии (112) карбида вольфрама (рис. 8) для всех исследованных образцов, межплоскостное расстояние этой линии сохраняется постоянным и равным $0,1016 \text{ нм}$, что соответствует литературным данным [6]. Напротив, обработка поверхности образцов оказывает влияние на уширение линии (112). При этом наибольшее значение β регистрируется у исходного образца и составляет $26,1 \cdot 10^{-3}$. Воздействие на образец тлеющего разряда с удельной мощностью горения $0,20 \text{ кВт/м}^2$ сопровождается сужением линии – здесь $\beta = 23,4 \cdot 10^{-3}$. Обработка приповерхностных слоев образцов в тлеющем разряде с удельной мощностью горения $0,50$ и $0,88 \text{ кВт/м}^2$ также по сравнению с исходным образцом приводит к дальнейшему уменьшению ширины линии (112) WC. В первом случае $\beta = 21,5 \cdot 10^{-3}$, во втором – $20,5 \cdot 10^{-3}$.

Выводы

Обработка инструментов из твердого сплава ВК8 в тлеющем разряде вызывает повышение поверхностной твердости, что обусловлено структурными изменениями в приповерхностных слоях на глубине до 220 мкм , одним из которых является уменьшение искажений как в связующем материале (Co), так и в твердой фазе (WC).

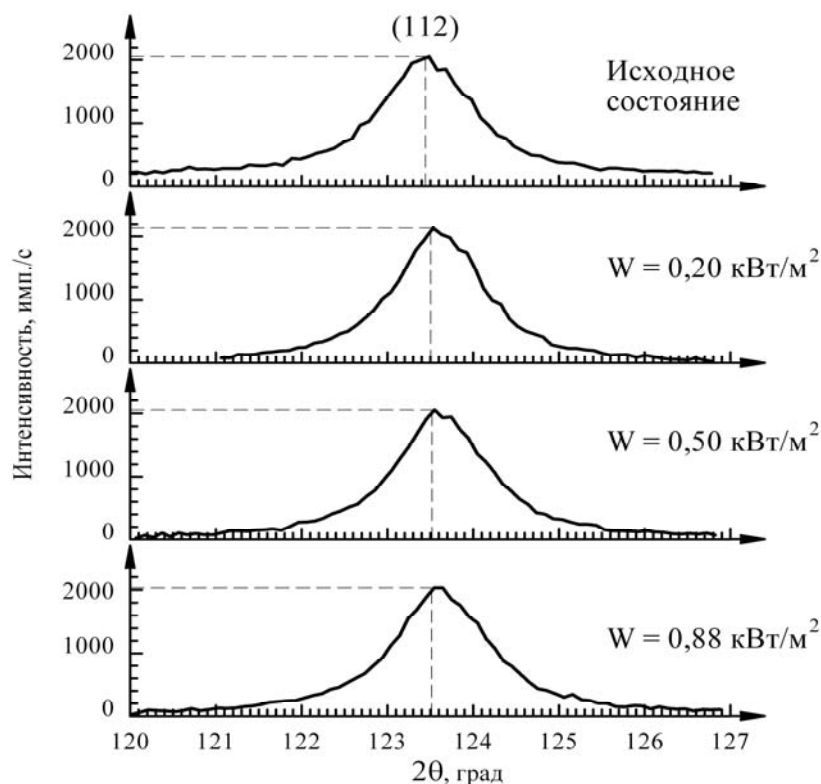


Рис. 8. Вид профиля линии (112) карбида вольфрама в исходном состоянии и после модифицирующей обработки в тлеющем разряде с различной удельной мощностью горения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1309593 СССР, ДСП С21 D1/78. Способ упрочнения изделий из металлов и сплавов / В. С. Камалов [и др.] (СССР). – № 3925462/22-02 ; заявл. 10.07.85 ; опубл. 08.01.87. – 4 с.
2. Ходырев, В. И. Прогрессивные электрофизические методы упрочнения твердосплавного инструмента / В. И. Ходырев, А. Ф. Короткевич, В. М. Шеменков // Вестн. МГТУ. – 2002. – № 2. – С. 159–163.
3. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 29 с.
4. Самохоцкий, А. И. Лабораторные работы по материаловедению : учеб. пособие для техникумов / А. И. Самохоцкий, М. Н. Кунявский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1971. – 184 с. : ил.
5. Лысак, Л. И. Определение истинной ширины рентгеновских интерференционных линий с применением стандартного образца / Л. И. Лысак // Вопросы физики металлов и металловедения : сб. тр. – Киев. – 1955. – № 6. – С. 40–53.
6. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учеб. пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 4-е изд., доп. и перераб. – М. : МИСИС, 2002. – 360 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 11.11.2009

V. M. Shemenkov, G. F. Lovshenko
Structural changes in the surface layers
of single-carbide hard metals as they are
processed in a glow discharge

The article describes the mechanisms of modification of the structure of single-carbide hard alloys of VK8 type, leading to increasing of surface hardness and wear resistance of tools. The results of scanning electron microscopy and X-ray analysis are presented in the article.

УДК 621.791

Д. И. Якубович, канд. техн. наук

ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ СБОРКИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ ДУГИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ШВА ПРИ СВАРКЕ ТОНКОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА

Рассмотрены особенности процесса формирования сварного шва при сварке металла малой толщины. Доказана эффективность использования поперечных колебаний электрода относительно оси шва для повышения качества сварного соединения. Определены допустимые значения амплитуд и частот колебаний электрода, позволяющие производить сварку тонколистовых соединений с нарушением точности сборки.

При сварке стыковых соединений вероятность образования прожогов увеличивается с ухудшением точности сборки кромок [1–3]. Сварка с небольшими зазорами (до 0,3...0,5 мм) особых трудностей не вызывает [4, 5], но с их увеличением до значений, равных толщине металла и более, выполнять сварку затруднительно, а порой и невозможно из-за возникающих дефектов в виде прожогов. В разработанных ранее технологиях сварки тонколистового металла [6, 7] говорится только о сварке с зазорами, влияние смещения кромок практически не исследовалось.

В настоящей работе рассматриваются особенности предотвращения прожогов при помощи циклических колебаний электрода поперек оси шва.

Для исследования влияния колебаний электрода на предотвращение прожогов был проведен ряд экспериментов. При их выполнении использовались пластины из низкоуглеродистых сталей толщиной 1 мм, на которые наплавлялись сварные швы без колебаний и с циклическими колебаниями электрода при амплитуде 2 мм и частоте 3 Гц. Режимы сварки при выполнении обоих швов устанавливались следующие: $I_{св} = 70...80$ А; $V_{св} = 5...10$ м/ч; $U_d = 19...20$ В. Для сварки использовались специально разработанная сварочная горелка и колебательное устройство.

Результаты исследований показали, что при сварке без колебаний элект-

рода с обратной стороны шва имеются большие (до 2 мм) провисания шва и дефекты в виде прожогов.

Швы, выполненные с применением колебаний перпендикулярно оси сварного шва, имеют незначительное провисание обратной стороны шва, прожоги отсутствуют. Применение поперечных колебаний электрода позволило получить качественное формирование сварного шва.

Для исследований сварки с колебаниями по зазору проводились эксперименты, при которых расстояние между кромками устанавливалось пропорционально толщине металла. Для стали толщиной $\delta = 1$ мм устанавливался зазор, равный $0,5\delta$. В сварном шве, выполненном без колебаний, прожоги отсутствовали, но провисание превышало допустимые стандартом величины. Увеличение расстояния между кромками деталей до $h = \delta$ привело к появлению прожогов. Повысить качество шва удалось, применив в процессе сварки циклические колебания электрода. Шов формировался качественный с провисанием, не превышающим 0,9 мм.

Результаты исследований показали целесообразность использования поперечных колебаний электрода для перекрытия зазора между свариваемыми кромками.

Производство высококачественных сварных тонколистовых конструкций возможно только при решении

комплекса задач, основной из которых является точная сборка под сварку [8], где смещение свариваемых кромок не превышает допустимых значений [9]. Обеспечение высокой точности сборки при сварке металла малой толщины затруднено даже с использованием частых прихваток. Из-за деформаций металла возникает смещение кромок. Влияние смещения кромок на устойчивость образования сварного соединения исследовалось при смещениях, равных $(0,1 \dots 1,0)\delta$.

При точной сборке изделия анодное пятно находится на обеих кромках. Траектория его перемещения и площадь

нагрева на каждой из них примерно одинаковы.

При одинаковом тепловом воздействии на металл уменьшение длины дуги увеличит её проплавляющую способность, а уменьшение площади анодного пятна приведет к повышению концентрации дуги и, как следствие, к ускоренному плавлению кромок металла. Это приведет к перемещению расплавленного металла с верхней кромки на нижнюю (рис. 1, а), увеличивая вероятность вытекания металла из сварочной ванны.

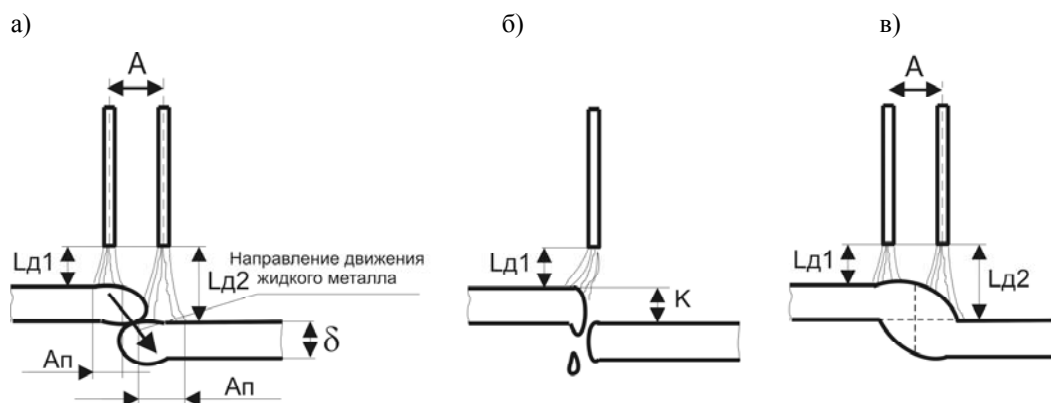


Рис. 1. Схема, отражающая условия горения дуги при сварке соединений со смещением кромок: L_d – длина дуги; A_p – анодное пятно; A – размах колебаний

Смещение кромок изменяет параметры дуги, что вызывает изменения в электрических процессах контура электрической цепи, которые приводят к нарушению устойчивости её горения [10]. На ближней кромке дуга становится короче, чем на дальней кромке (см. рис. 1, а). Восстановление стабильности в дуге происходит за счет процессов саморегулирования.

При проведении исследований условие устойчивости саморегулирования дуги при сварке плавящимся электродом определялось по статическим вольт-амперным характеристикам источника питания и дуги.

Изменение длины дуги L_d на малую величину l_d происходит при нали-

чии перекоса кромок в момент её перехода с одной кромки металла на другую. Вызванные изменения сопровождаются нарушением устойчивости режима сварки и появлением отклонений сварочного тока i_d и напряжений источника питания [11].

Для сокращения времени переходных процессов $t_p \approx 3\tau$ при саморегулировании дуги необходимо стремиться к применению электродных проволок малого диаметра и уменьшению разницы динамических сопротивлений дуги и источника питания.

Перекося кромок, вызывающий резкое изменение длины дуги, приводит к включению процесса саморегулирования, который по причине кратковре-

менного нахождения дуги на одной кромке ограничен во времени. При частоте колебания электрода 3 Гц время его нахождения на одной кромке составляет 0,165 с. За этот промежуток времени процесс горения дуги должен полностью восстановиться.

Наиболее полное описание процесса саморегулирования и его исследование при сварке со смещением кромок можно получить при изучении структурной схемы процесса. Анализ динамики переходного процесса осуществлялся при помощи оболочки Simulink программы Matlab, предназначенной для расчета переходных процессов в моделях структурных схем.

Исходные данные для расчетов выбирались с учетом требований, предъявляемых к сварке тонколистового металла. Напряженность электрического поля определялась из соотношения номинального напряжения на дуге к

номинальной длине дуги. В связи с тем, что необходимо использовать жесткую вольт-амперную характеристику сварочного источника, связь между $I_{св}$ и $U_{св}$ описывается безынерционным звеном с коэффициентом передачи $1/R_{и}$ ($R_{и}$ – сопротивление источника питания при номинальном режиме работы). Коэффициент саморегулирования по току и напряжению принимался согласно [9]; постоянную времени плавления электродной проволоки принимали равной 1/3 от времени её плавления.

Номинальный сварочный ток устанавливался 80 А, напряжение на дуге – 20 В, длина дуги равнялась 3, 5 и 10 мм. Возмущения по длине дуги изменялись от 0,1 до 1 мм с шагом 0,1 мм.

Результаты расчета переходных процессов в программе Matlab для номинальной длины дуги, равной 5 мм, приведены на рис. 2.

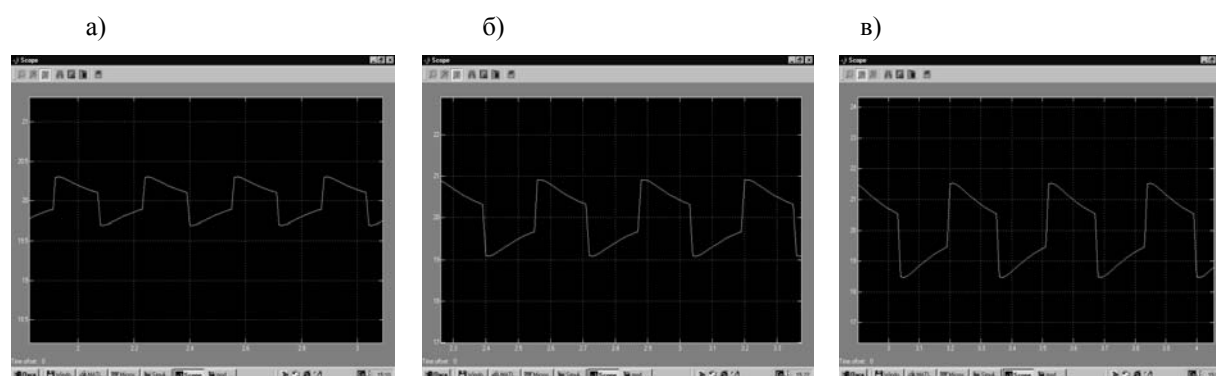


Рис. 2. Изменения напряжения на дуге при возмущениях, равных: а – 0,1 мм; б – 0,3 мм; в – 0,5 мм

Полный расчет (в виде графиков) для различных длин дуг и возмущений по их длине представлен на рис. 3.

Процесс считался устойчивым, когда напряжение попадало в область, равную 5 % от номинального значения напряжения на дуге (19...21 В).

Исследования показали, что с увеличением длины дуги процесс саморегулирования происходит более устойчиво. Из выбранных значений наиболее устойчивой является дуга длиной 10 мм.

При возрастании возмущений на дуге перераспределение по её длине увеличивается.

В результате исследований установлено, что при переходе дуги через смещение кромок напряжение на дуге изменяется скачкообразно за 0,01...0,02 с. Время стабилизации напряжения (время регулирования) составляет 0,1...0,15 с, которого достаточно для стабилизации дуги перед следующим её переходом через кромку металла.

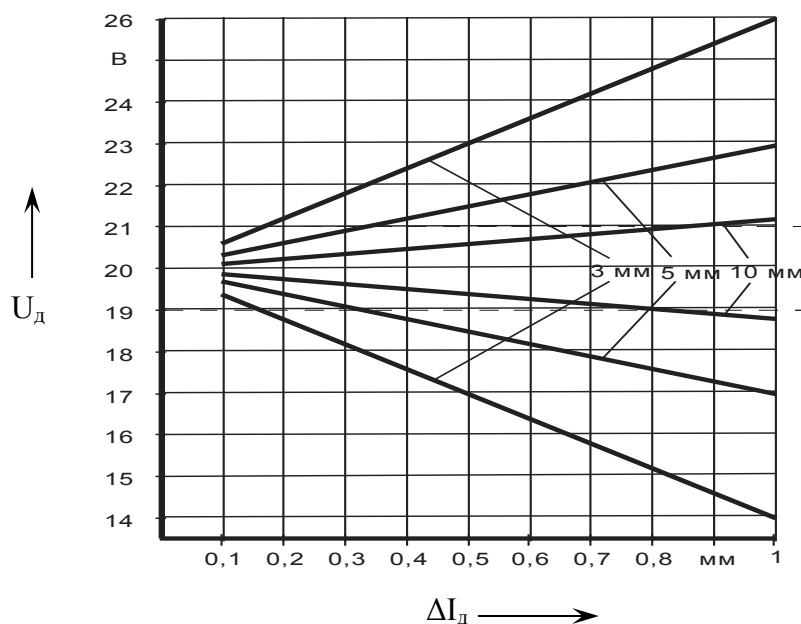


Рис. 3. Максимальное перерегулирование напряжения на дуге при увеличении возмущений

Полученные результаты позволили установить линейную зависимость изменения напряжения на дуге при различных возмущениях её длины.

По принципу минимума, сформулированному Штейнбеком, дуга горит в условиях, когда потери энергии минимальны. В рассматриваемом случае минимум затрат энергии будет при горении короткой дуги, следовательно, между электродом и дальней кромкой горения дуги происходить не будет (рис. 1, б). Энергия дуги будет затрачена на расплавление верхней кромки с образованием прожогов преимущественно с одной стороны шва.

Для предотвращения одностороннего горения дуги следует вынудить её гореть на обеих кромках при помощи циклических колебаний электрода (рис. 1, в).

Подтверждение эффективности принудительного перемещения дуги получено при исследованиях, проводившихся на образцах со смещением кромок, изменяющимся от $K = 0,1\delta$ до $K = 1\delta$ мм при сварке без зазора. Смещение величиной до $(0,3...0,4)\delta$ существенных трудностей получения качественного

сварного соединения не вызывает.

При увеличении смещения кромок до величин, равных толщине металла, возникают прожоги и чрезмерно провисает обратная сторона шва. Устранить дефекты можно при помощи циклических колебаний электрода. Выполненные швы представлены на рис. 4.

Швы сформировались с провисанием – не более 0,3 мм, шириной шва – 4,5...5,0 мм и высотой – 0,6...0,7 мм. Смещения кромок, превышающие толщину металла, не позволяют получать качественные соединения даже с применением колебаний.

Колебания электрода позволяют выполнять соединения не только с зазорами между кромками, но и с их смещением.

Результаты данных исследований послужили основанием для разработки технологии роботизированной сварки, реализованной на роботизированном комплексе РМ-01. Сварные швы выполнялись без колебаний и с колебаниями электрода. Автоматизация процесса позволила улучшить качество сварного шва и исключить влияние квалификации сварщика (рис. 5).

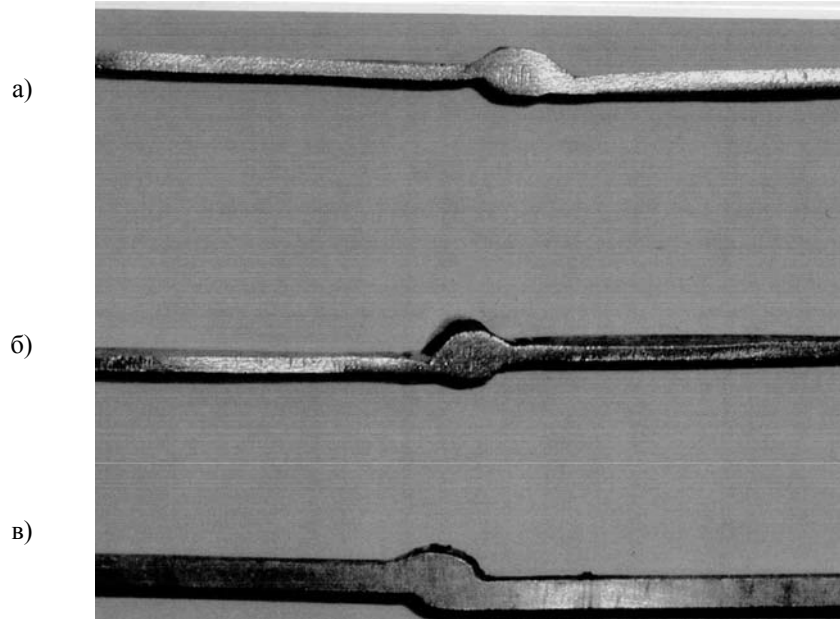


Рис. 4. Сварные соединения, выполненные со смещением кромок: толщина образцов а и б – 1 мм; в – 2 мм; смещение кромок а – 0,58; б – 1,08; в – 0,88

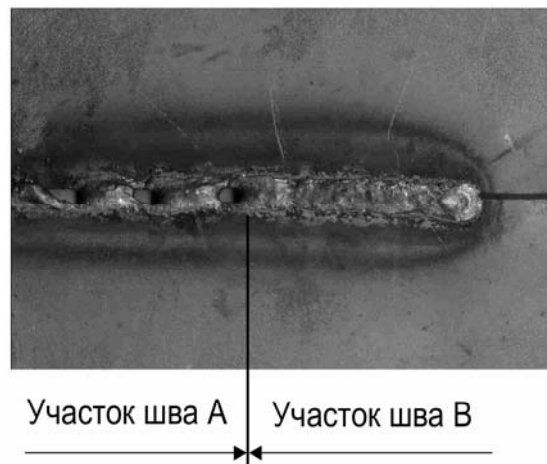


Рис. 5. Сварной шов, выполненный на роботизированном комплексе РМ-01: участок шва А выполнен без колебаний электрода; участок шва В – с колебаниями электрода

На рис. 5 показано соединение с величиной зазора 1 мм при толщине металла 1 мм. Начало шва выполнено без колебаний электрода, имеет прожоги шириной 2...3 мм, расположенные на одинаковом расстоянии 9...11 мм, что говорит о постоянстве появления такого рода дефектов.

Вторая часть шва выполнена с колебаниями электрода, прожоги отсутст-

вуют, имеется равномерное провисание шва 0,2...0,4 мм.

В результате проведенных исследований определены требования к сборке сварных соединений. Установлено, что при сварке на найденных оптимальных режимах допустимая величина зазора между кромками изделия и величина смещения кромок при сварке металла малой толщины могут состав-

лять от 0 до 100 % толщины металла ($K = \delta$; $h = \delta$).

Выводы

1. Установлены максимально допустимые зазоры между кромками стыковых соединений, выполненных из тонколистовой стали, при которых возможно успешное формирование сварного шва и доказана эффективность использования поперечных колебаний электрода относительно оси шва для качественного перекрытия зазора.

2. Впервые исследовано влияние смещения кромок соединяемых деталей на процесс сварки металла малой толщины и установлены допустимые значения амплитуд и частот колебаний электрода, позволяющие производить сварку соединений со смещением кромок, равным 10...100 % от толщины металла.

3. Разработана технология роботизированной сварки тонколистовой стали с величиной зазора, равной толщине металла, и найдены оптимальные режимы сварки, позволяющие выполнять сварное соединение при напряжении 20 В, силе сварочного тока 70...80 А, частоте колебаний электрода 3...4 Гц, амплитуде колебаний 2 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Маслов, Ю. А.** Автоматическая сварка тонколистовой высокопрочной стали / Ю. А. Маслов, В. Д. Горожанин. – М. : Машгиз, 1961.

2. **Рабинович, И. Я.** Развитие оборудования для дуговой электрической сварки / И. Я. Рабинович // Перспективы развития электросварочного оборудования в СССР (1959–1965): сб. тр. – М., 1958.

3. **Никифоров, Г. Д.** Особенности формирования ванны на весу при сварке тонколистовых материалов световым лучом дуговых ксеноновых ламп / Г. Д. Никифоров, М. И. Опарин, С. А. Федоров // Сварочное производство. – 1978. – № 8. – С. 1–3.

4. **Потапьевский, А. Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А. Г. Потапьевский. – М. : Машиностроение, 1974. – 240 с.

5. Сварка в машиностроении : справочник в 4 т. / Под ред. Г. А. Николаева [и др.]. – М. : Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 504 с.

6. **Алекин, Л. Е.** Влияние параметров режима и точности сборки соединения на формирование шва на весу / Л. Е. Алекин, Н. А. Ильенко // Автоматическая сварка. – 1967. – № 1. – С. 19–21.

7. **Эсибян, Э. М.** Аргонно-дуговая сварка продольных швов оболочек малого диаметра / Э. М. Эсибян, Б. И. Шнайдер // Автоматическая сварка. – № 12. – 1964. – С. 17–19.

8. **Рязанцев, В. И.** Аргоннодуговая сварка тонкостенных конструкций / В. И. Рязанцев, В. А. Федосеев // Сварочное производство. – 1998. – № 9. – С. 28–32.

9. **Шахматов, М. В.** Нормирование смещения свариваемых кромок в механически неоднородных сварных соединениях / М. В. Шахматов, В. В. Ерофеев, В. В. Коваленко // Сварочное производство. – 2002. – № 8. – С. 12–16.

10. **Львов, Н. С.** Автоматика и автоматизация сварочных процессов : учеб. пособие / Н. С. Львов, Э. А. Гладков. – М. : Машиностроение, 1982.

11. Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. – Киев : Вища шк., 1986.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 22.05.2009

D. I. Yakubovich

Influence of accuracy of assemblage on stability of burning of an arch and the geometrical sizes of a seam at welding of thin sheet metal

Features of process of formation of a welded seam are considered at welding of metal of a small thickness. Efficiency of use of cross-section fluctuations of an electrode concerning an axis of a seam for improvement of quality of welded connection is shown. Admissible values of amplitudes and frequencies of fluctuations of the electrode are defined, allowing to make welding thin sheet connections with infringement of accuracy of assemblage.

СТРОИТЕЛЬСТВО . АРХИТЕКТУРА

УДК 624.073.6:534.014.1

П. В. Алявдин, д-р техн. наук, проф., Ю. А. Музычкин**АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА ПЕРЕКРЫТИЯ ЗДАНИЯ**

Исследованы собственные частоты колебаний шарнирно опертого фрагмента железобетонного перекрытия зданий, состоящего из сборной многпустотной плиты и монолитных балок обвязочного пояса по контуру перекрытия. Рассмотрены как исходная расчетная модель фрагмента в виде плитно-балочной системы, так и ее упрощенная модель в виде стержневой системы. Для исходной модели выполнен расчет с использованием конечно-элементной программы *ANSYS*. Проведен полномасштабный натурный эксперимент для колебаний фрагмента при различных видах динамического воздействия, включая удар, гармоническую силу и возмущение по случайному закону, в виде белого шума. Аналитические и численные результаты сопоставлены с экспериментальными данными. Исследована чувствительность собственных частот колебаний фрагмента. Решена задача идентификации параметров фрагмента на основе измеренных параметров его вибрации.

Введение

Исследование собственных частот колебаний строительных конструкций имеет большое значение при решении различных задач динамики, в том числе сеймики, виброизоляции и акустики [1]; анализ путей распространения структурного шума и вибрации в здании представляет сложную инженерную задачу. В существующих зданиях под действием окружающей среды и динамических нагрузок происходит накопление микрповреждений и, соответственно, изменение механических свойств материалов. Это приводит к изменению частот собственных колебаний конструкции здания и при наличии в нем виброактивного технологического оборудования может стать причиной опасного резонанса, связанного с совпадением частот собственных колебаний конструкции и действующих на нее внешних сил. До настоящего времени при проектировании зданий данный эффект не учитывается.

В работе рассмотрен фрагмент железобетонного перекрытия типовой конструкции жилого здания с каркасной

или каркасно-стеновой несущей системой, широко применяемой в строительстве в Беларуси и странах СНГ. Фрагмент состоит из сборной многпустотной плиты и монолитных балок – несущих ригелей обвязочного пояса по контуру перекрытия. Он опирается или на колонны по углам перекрытия в случае каркасной системы, или на стены в случае каркасно-стеновой системы. Ниже проанализирован второй вариант данной системы.

Для частот собственных колебаний шарнирно опертого по торцам фрагмента получены аналитические решения на основе метода перемещений, разработанного для анализа стержневых систем [2]. Численный анализ всего фрагмента выполнен с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Для указанного фрагмента проведен полномасштабный натурный эксперимент с возбуждением колебаний ударом, гармонической силой и силой с изменяющейся по случайному закону частотой возмущения (белый шум).

Результаты расчета сопоставлены с полученными экспериментальными

данными. Решена задача идентификации параметров фрагмента на основе измеренных параметров его вибрации.

Описание конструкции фрагмента

Фрагмент состоит из сборной многопустотной плиты и монолитных балок – несущих ригелей обвязочного пояса по контуру перекрытия. При этом плита замоноличена по торцам в поперечные балки, но не связана по длине с продольными балками обвязочного пояса

(рис. 1). Таким образом, плита заключена в обойму в продольном направлении.

Сопряжение несущего ригеля (разрез 2–2) с многопустотной плитой осуществлено посредством выпусков рабочей арматуры из плит, заанкериваемых в несущих ригелях на длину 150 ± 10 мм, и бетонных шпонок, входящих в открытые по торцам пустоты плит [3], как предусмотрено в конструктивном решении типовой серии Б1.020.1–7.

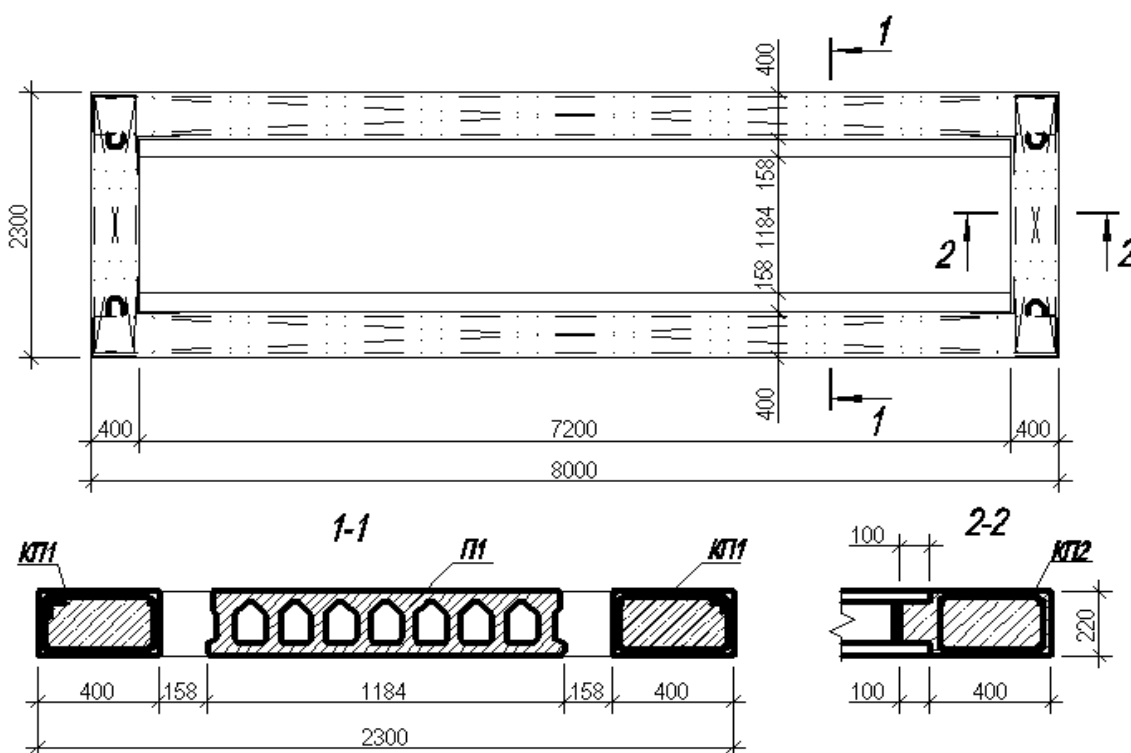


Рис. 1. Конструкция исследуемого фрагмента

Характеристики фрагмента.

Плита ПБФ 72.12.2-К7(9)8-4Т (П1 на рис. 1): бетон М400 (по испытаниям) – модуль упругости $E_b = 36,9$ ГПа; $A = 0,1582$ м²; $I = 0,891 \cdot 10^{-3}$ м⁴; $\rho = 2500$ кг/м³; осевая сжимающая сила N , возникающая в результате предварительного напряжения арматуры, $N = 0,3$ МН; арматура – канаты К7, диаметр 9 мм, количество канатов – 8 шт., $E = 190$ ГПа; количество стержней верхней арматуры

5-ВрП – 4 шт.; модуль упругости арматуры $E_s = 200$ ГПа (данные о характеристиках арматуры приняты в соответствии с [4]); приведенный модуль упругости для всего сечения $E_{red} = 38,7$ ГПа, G – модуль сдвига, $G = 0,4 E_{red} = 14,8$ ГПа.

Монолитный обвязочный пояс (КП1 и КП2 на рис. 1): бетон С25/30, модуль упругости бетона $E_b = 38,7$ ГПа, арматура S500, верхний пояс – 2Ш16, нижний пояс – 2Ш22, модуль упруго-

сти арматуры $E_s = 200$ ГПа; приведенный модуль упругости для всего сечения $E_{red} = 39,6$ ГПа, G – модуль сдвига, $G = 0,4 E_{red} = 15,8$ ГПа.

Аналитический расчет фрагмента

Расчет фрагмента выполнен методом перемещений (названным в [2] методом деформаций). Вывод уравнений колебания дважды кинематически неопределимой стержневой системы, имеющей бесконечное число динамиче-

ских степеней свободы, представлен в [5]. Принятая расчетная схема фрагмента представлена на рис. 2, б.

Параметры d, a, k, f в формулах (1)...(6) зависят от вектора физико-механических и геометрических характеристик элементов $z, z = (EI_i, GA_i, \mu_i, k^*_i, N_i, i \in 1:3) \in R^{15}$, а также от схемы соединения i -х элементов во фрагменте; i – индексы элементов, $i \in 1:3$; 1, 3 – индексы для балок обвязочного пояса соответственно; 2 – для плиты перекрытия.

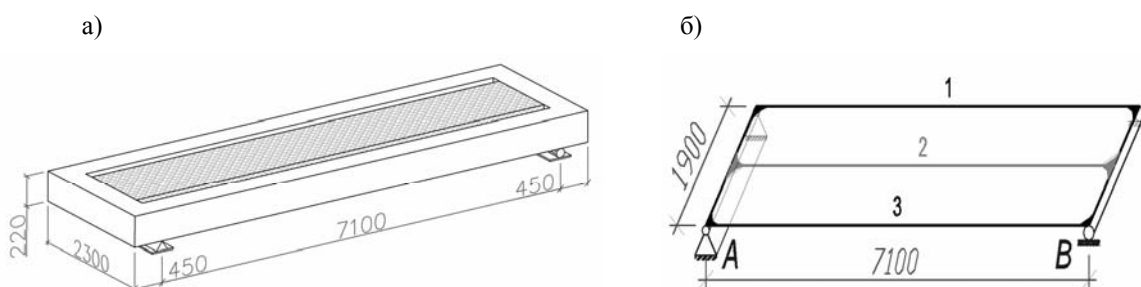


Рис. 2. Расчетная модель исследуемого фрагмента: а – исходная плитно-балочная система; б – упрощенная стержневая система

Для данных граничных условий и с учетом инерции вращения и деформаций сдвига, а также предварительного напряжения параметры d, a, k, f для каждого i -го элемента фрагмента принимают следующие значения:

$$d = l \cdot \sqrt{-P_A + \sqrt{P_A^2 + P_B}}; \quad (1)$$

$$a = l \cdot \sqrt{P_A + \sqrt{P_A^2 + P_B}}; \quad (2)$$

$$P_A = \frac{\mu\omega^2 \left(r^2 + \frac{EI}{k^*GA} \right) - N \left(1 - \frac{N}{k^*GA} \right)}{2EI}; \quad (3)$$

$$P_B = \frac{\mu\omega^2 \left(1 - \frac{\mu\omega^2 r^2 - N}{k^*GA} \right)}{EI}; \quad (4)$$

$$f = \frac{d}{1 - \frac{N}{k^*GA}} \left[1 + \frac{a^2}{l^2} \frac{EI}{k^*GA - N - \mu\omega^2 r^2} \right]; \quad (5)$$

$$k = \frac{a}{1 - \frac{N}{k^*GA}} \left[1 - \frac{d^2}{l^2} \frac{EI}{k^*GA - N - \mu\omega^2 r^2} \right]. \quad (6)$$

Два независимых уравнения равновесия моментов – на левой (А) и правой (В) опорах фрагмента:

$$\sum_{i \in 1:3} M_{Ai}(z, \omega) \pm \sum_{i \in 1:3} M_{Bi}(z, \omega) = 0, \quad (7)$$

где знаки «+» и «-» учитывают колебания с нечетным и четным количеством полуволин соответственно;

$$M_{Ai}(z, \omega) = -\frac{EI}{l} [(ka + fd)(k \sinh d - f \sin a)] / [2kf(\cosh d \cos a - 1) + (k^2 - f^2) \sinh d \sin a], \quad i \in 1:3; \quad (8)$$

$$M_{Bi}(z, \omega) = -\frac{EI}{l} [(ka + fd)(f \cosh d \sin a - k \sinh d \cos a)] / [2kf(\cosh d \cos a - 1) + (k^2 - f^2) \sinh d \sin a], \quad i \in 1:3. \quad (9)$$

Из уравнения (7) с учетом формул (8) и (9) определяется бесконечное число частот собственных колебаний ω трех элементов фрагмента (двух балок и плиты) [6, 7]. Результаты расчета представлены в табл. 1. Там же представлены результаты полномасштабного натурного эксперимента, выполненного в цехе «Института БелНИИС» [9]. Проведенные исследования отличаются между собой характером динамического воздействия: 1) удар в 1/2, 1/3 и 1/4 пролета; 2) белый шум с полосой частот

5...200 Гц от вибровозбудителя, подключенного к генератору; 3) гармоническое воздействие от вибровозбудителя на резонансной частоте ($f \approx 8,0$ Гц).

Заметим, что в данном разделе рассматривались только поперечные колебания в направлении пролета фрагмента как наиболее важные для практики; учет других, в том числе продольных и пространственных крутильных колебаний, выполняется аналогично, как аналитически, так и численно, методом КЭ [8].

Табл. 1. Результаты аналитического расчета собственных частот и форм колебаний фрагмента

Частота f_i , Гц	i -я форма	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Результаты расчета	8,48	14,1	19,02	33,26	36,7	52,09	73,74	82,9	101,1
	Экспериментальные данные	8,3	14,9	—*	32,0	41,6	47,6	72,0	85,0	102,3
Примечание — * — Значения 3-й частоты колебаний в эксперименте не были получены										

Чувствительность собственных частот колебаний плитно-балочного фрагмента

Исследована чувствительность собственных частот колебаний фрагмента [10–12] в зависимости от модулей упругости бетона для пустотной плиты перекрытия и балок обвязочного пояса. Модули упругости изменялись в диапазоне от -15 до +15 % с шагом 5 %. В

данном случае выбран более широкий диапазон собственных частот колебаний, чем в табл. 1. Влияние модулей упругости на собственные частоты колебаний представлено в табл. 2. Как видно из приведенных результатов, изменения параметров системы оказывают большее влияние на высокие частоты колебаний.

Табл. 2. Влияние изменения модулей упругости от -15 до +15 % для плиты перекрытия и балок обвязочного пояса на собственные частоты колебаний

Частота f_i , Гц	Характерные i -е частоты колебаний f_i													
	1		3		4		6		7		9		10	
	f_i	%	f_i , Гц	%	f_i , Гц	%	f_i , Гц	%	f_i , Гц	%	f_i , Гц	%	f_i , Гц	%
	8,16	-3,9	18,27	-4,1	32,09	-3,6	49,83	-4,5	71,36	-3,3	96,42	-4,9	125,16	-3,0
	8,27	-2,5	18,54	-2,6	32,5	-2,3	50,61	-2,9	72,22	-2,1	98,02	-3,2	126,57	-1,9
	8,37	-1,3	18,79	-1,2	32,89	-1,1	51,36	-1,4	73,01	-1,0	99,6	-1,6	127,82	-0,9
	8,48	0,0	19,02	0,0	33,26	0,0	52,09	0,0	73,74	0,0	101,15	0,0	128,95	0,0
	8,58	1,2	19,25	1,2	33,62	1,1	52,79	1,3	74,42	0,9	102,68	1,5	129,97	0,8
	8,68	2,3	19,46	2,3	33,95	2,0	53,48	2,6	75,06	1,8	104,18	2,9	130,9	1,5
	8,78	3,4	19,67	3,3	34,28	3,0	54,15	3,8	75,65	2,5	105,66	4,3	131,75	2,1

Аналогичный анализ влияния массы пустотной плиты перекрытия и балок обвязочного пояса на собственные частоты колебаний представлен на рис. 3. Масса фрагмента изменялась в диапазо-

не от 0 до +15 % с шагом 5 %. Как и ранее, здесь изменения параметров системы также оказывают большее влияние на высокие частоты колебаний.

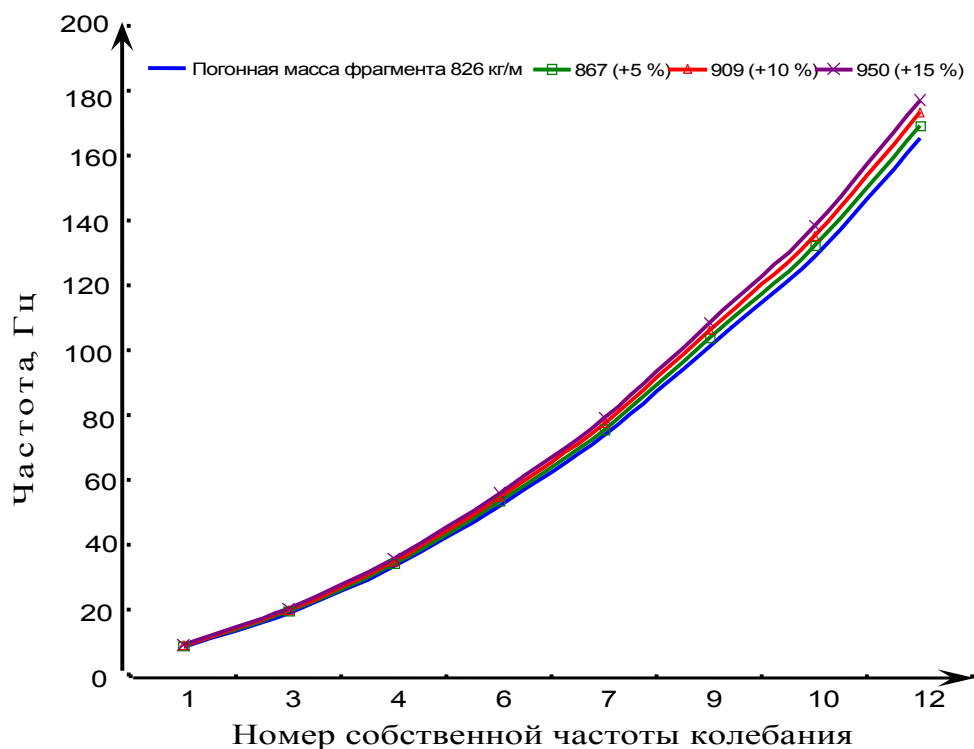


Рис. 3. Влияние массы фрагмента на собственные частоты колебаний (диапазон от 0 до +15 %)

Идентификация параметров системы

В качестве параметров идентификации для фрагмента перекрытия зданий выбраны модули упругости бетона для сечений плиты и ригелей E_p и E_r соответственно, тогда вектор искомых параметров $\mathbf{x} = (E_p, E_r) \in \mathbf{R}^n$, $n = 2$.

Критерий оптимальности, который необходимо минимизировать в данной задаче при выполнении аналитических условий (1)–(9), принимается в виде суммы наименьших квадратов нормированных отклонений частот:

$$\rho(\mathbf{x}) = \sqrt{\sum_{i \in I} \left(\frac{f_{mi} - f_{ci}(\mathbf{x})}{(f_{mi} + f_{ci}(\mathbf{x}))/2} \right)^2}, \quad (10)$$

где f_{mi} – измеренные значения частот собственных колебаний, $i \in I$; I – множество рассматриваемых частот; $f_{ci} \equiv f_{ci}(\mathbf{x})$ – значения частот собственных колебаний, вычисленные по формулам (1)–(9) и зависящие от вектора $\mathbf{x}$. Здесь исследовались семь частот собственных колебаний, $|I| = 7$.

Поскольку задача идентификации системы является некорректной, критерий оптимальности (10) следует видоизменить:

$$\rho_\alpha(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x}) + \alpha \|\mathbf{x}\|^2, \quad (11)$$

где α – параметр регуляризации А. Н. Тихонова [13], $\alpha > 0$; $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\sum_{i \in I, n} (x_i^2)}$.

Выбор параметра регуляризации α_k на k -м шаге процесса вычислений, $k = 0, 1, \dots, K$, производим по формуле

$$\alpha_k = \alpha_0 q^k, \quad q > 0, \quad (12)$$

решая $(K + 1)$ раз для параметра α_{k+1} задачу

$$\|x_{\alpha_{k+1}} - x_{\alpha_k}\| \rightarrow \min_{k \in 0:K} \quad (13)$$

вплоть до приемлемой точности решения исходной задачи (13).

Аналогичная идентификация была выполнена также численно, с использованием метода *subproblem approximation*, реализованного в коммерческой конечно-элементной программе *ANSYS* [8].

Расчет задачи (13) был закончен на 10-м шаге итерации.

Полученный в обоих случаях практически один и тот же оптимальный вектор параметров системы x^* содержит следующие значения модулей упругости бетона: для плиты $E_p = 38,01$ ГПа (увеличение расчетного модуля на 3 %) и для ригелей $E_r = 33,67$ ГПа (уменьшение расчетного модуля на 13 %). Сопоставление частот собственных колебаний фрагмента, найденных расчетным путем аналитически и численно по программе *ANSYS*, с результатами измерений приведено в табл. 3.

Табл. 3. Сопоставление расчетных и измеренных частот собственных колебаний фрагмента

Частота	<i>i</i> -я форма колебаний						
	1	2	3	4	5	6	7
f_{mi} , Гц	8,30	14,90	32,00	47,60	72,00	102,30	121,80
f_{ci} , Гц, (5)...(11)	8,29	14,11	32,28	51,06	71,19	99,70	123,91
$\varepsilon_{fi} \cdot 100 \%$ *	0,175	5,413	0,879	7,013	1,132	2,578	1,715
f_{ci} , Гц, <i>ANSYS</i>	8,38	13,52	32,55	47,23	72,72	102,97	120,36
$\varepsilon_{fi} \cdot 100 \%$ *	0,96	9,71	1,70	0,78	1,00	0,65	1,19
Примечание – * – Отклонения ε_{fi} определялись по формуле $\varepsilon_{fi} = (f_{mi} - f_{ci}) / [(f_{mi} + f_{ci}) / 2]$							

Выводы

В статье представлены аналитические зависимости и численные результаты, а также экспериментальные данные полномасштабного натурного эксперимента для анализа колебаний фрагмента перекрытия, состоящего из многопустотной плиты и обвязочного пояса.

1. Выполнен теоретический анализ собственных частот колебаний фрагмента перекрытия. Частоты вычислены аналитически, с учетом инерции вращения, деформаций сдвига и силы предварительного напряжения арматуры пустотной плиты перекрытия. Параллельно выполнен расчет с использо-

ванием конечно-элементной программы *ANSYS*.

2. Результаты расчетов плиты перекрытия согласуются с экспериментальными данными в пределах 10 %.

3. Выявлено увеличение чувствительности более высоких собственных частот колебаний фрагмента в зависимости от изменения его параметров. Установлено, что при изменении обоих модулей упругости пропорционально исходному значению в диапазоне от -15 до +15 % собственные частоты колебаний фрагмента изменяются в диапазоне от -5,2 до 4,7 % от расчетного значения. Аналогично изменение массы фрагмен-

та в диапазоне от -15 до +15 % изменяет собственные частоты колебаний в диапазоне от -8,5 до 6,7 %.

4. Решена задача идентификации параметров фрагмента на основе измеренных параметров его вибрации. Найденные следующие значения модулей упругости бетона: для плиты $E_p = 38,01$ ГПа (увеличение расчетного модуля на 3 %) и для ригелей $E_r = 33,67$ ГПа (уменьшение расчетного модуля на 13 %). Результаты, полученные на основе идентификации системы, позволяют повысить точность прогноза параметров вибрации для широкого круга задач динамики, сейсмоки и виброэкологии зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Paz, M.** Structural Dynamics. Theory and computation. – Fourth Edition / M. Paz, W. Leigh. // Springer, 1997. – 840 p.
2. **Колоушек, В.** Динамика строительных конструкций / В. Колоушек. – М. : Стройиздат, 1965. – 632 с.
3. Плиты железобетонные многослойные предварительно-напряженные стенового безопалубочного формования. Типовая серия 0–264. Вып. 2. – 20 с.
4. **СНБ 5.03.01-02.** Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва РБ, 2003. – 139 с.
5. **Алявдин, П. В.** Свободные колебания плитно-балочного фрагмента перекрытия зданий / П. В. Алявдин, Ю. А. Музычкин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2009. – № 1. – С. 62–67.
6. **Borkowski, A.** Mechanika budowli z elementami ujęcia komputerowego / A. Borkowski. – Warszawa : Arkady, 1984. – Т. 1. – 428 s.
7. **Тимошенко, С. П.** Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер. – М. : Машиностроение, 1985. – 472 с.
8. **Hatch, M. R.** Vibration simulation using MATLAB and ANSYS / M. R. Hatch, B. Raton // Chapman and Hall. – CRC, 2001. – 654 p.
9. **Aliawdin, P.** Natural frequencies of RC floor fragment with restricted displacements / P. Aliawdin, J. A. Muzychkin // Konstrukcje zespolone : konf. – Zielona Gora : Oficyna Wydaw. Uniwersytetu Zielonogorskiego, 2008. – Т. VIII. – С. 9–24.
10. **Хог, Э.** Анализ чувствительности при проектировании конструкций / Э. Хог, К. Чой, В. Комков. – М. : Мир, 1988. – 428 с.
11. **Гасюнас, В. В.** Проектирование динамических моделей конструкций по собственным частотам с использованием методов анализа чувствительности / В. В. Гасюнас, А. Н. Солдаткин // Механика композиционных материалов и конструкций. – 1997. – Т. 3, № 2. – С. 63–74.
12. Идентификация динамической модели по результатам вибрационных испытаний фрагмента безригельного каркаса с использованием ВК SCAD, CAD Master / Л. П. Бержинская [и др.] // Архитектура и строительство. – 2007. – № 2. – С. 94–98.
13. **Тихонов, А. Н.** Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1974. – 286 с.

Заходнепоморский технологический университет

НИЛ строительной акустики и вибрационной безопасности РУП «Институт БелНИИС»

Материал поступил 20.04.2009

P. V. Aliawdin, J. A. Muzychkin **The analysis of dynamic model** **of the building floor slab fragment**

Natural frequencies of oscillations of the hinged fragment consisting of a hollow-core slab of reinforced-concrete flooring, embedded on end faces in a girt strip have been analyzed. Both the initial calculation model of the fragment in a slab-beam system form and its simplified model in the bar system form have been examined. For the initial model, the calculation has been made with the finite-element ANSYS program. Full-scale natural experiment for fragment oscillations has been made at various aspects of dynamic affecting, including shock, the harmonious force and perturbation under the casual law (white noise). Analytical and numerical effects have been compared with experimental data. The sensitivity of natural frequencies of the fragment oscillations has been analyzed. The task of the fragment parameters identification on the basis of its vibration data has been solved.

ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 504:001.12/.18

**С. Д. Галюжин, канд. техн. наук, доц., Д. С. Галюжин, канд. техн. наук,
О. М. Лобикова**

НООСФЕРА ИЛИ ТЕХНОСФЕРА?

Проведен анализ процессов и проблем преобразования биосферы в ноосферу. Показано, что научно-технические задачи такого преобразования находятся лишь в стадии постановки вопроса. Отмечено, что у современной цивилизации есть два пути развития: человечество будет продолжать наращивать добычу полезных ископаемых, неуклонно совершенствуя общество потребления, или перейдет к новому типу цивилизации, в котором его потребности не будут выходить за рамки возможностей биосферы.

В последние годы в среде ученых-экологов, да и не только экологов, все острее ставится вопрос – в каком направлении идет развитие биосферы? Одни утверждают, что человечество постепенно преобразует биосферу Земли в ноосферу, другие – происходит постепенный переход биосферы в техносферу.

Необходимо разобраться в понятиях «ноосфера» и «техносфера». Под впечатлением лекций В. И. Вернадского (Сорбонна (Париж) 1922–1923), французский математик и философ Э. Ле Руа начал разработку концепции перехода биосферы в новое состояние, когда определяющим фактором ее развития является разум человечества. Для обозначения этого нового состояния он ввел термин «*ноосфера*» (греч. *noos* – разум, *sphaira* – сфера, шар), т. е. в дословном переводе данный термин означает – «сфера разума». Позднее вклад в становление теории о ноосфере внес французский геолог и палеонтолог П. Тейяр де Шарден. В современном понимании ноосфера – «новое эволюционное состояние биосферы, при котором разумная деятельность человека становится решающим фактором ее развития» [1, с. 1062]. Однако основоположником теории ноо-

сферы следует считать гениального русского ученого В. И. Вернадского. В результате анализа процессов, происходящих в биосфере в XX столетии, он сделал следующие обобщения: 1) человек стал крупнейшей геологической силой; 2) эволюция разума человека происходит значительно быстрее по сравнению с эволюцией человека как биологического вида; 3) человечество на нашей планете стало единым целым. В. И. Вернадский писал: «Лик планеты – биосфера – химически резко меняется человеком сознательно и главным образом бессознательно» [2, с. 149]. Оценивая резко возрастающую мощь цивилизации, он пришел к логическому выводу – человечество как разумная часть живого вещества планеты должна взять на себя ответственность за будущее биосферы. Переход биосферы в новое состояние В. И. Вернадский рассматривал как один из важнейших и неизбежных этапов приспособления человечества: «Человечество, взятое в целом, становится мощной геологической силой. И перед ним, перед его мыслью и трудом, становится вопрос о перестройке биосферы в интересах свободно мыслящего человечества как единого целого. Это новое

состояние биосферы, к которому мы, не замечая этого, приближаемся, и есть „ноосфера”» [2, с. 148].

В. И. Вернадский четко представлял, что человечество находится только в начале процесса перехода к ноосфере. Он ясно осознавал, что усиливающееся давление человека на окружающую среду ведет к исчезновению многих видов, к изменению численных соотношений между другими видами. Природные экосистемы заменяются антропогенными, а в оставшихся – коренным образом перестраиваются биотические связи, упрощается структура трофических цепей. Он утверждал, что антропогенные экосистемы с биогеохимической и энергетической точек зрения обладают меньшей геохимической энергией и могут сохраняться только при условии поступления к ним дополнительной энергии со стороны человека. Тем не менее он был оптимистом. Его оптимизм базировался на ясном понимании того, что переход к ноосфере – единственный путь выживания человечества.

Дальнейшее развитие учение о ноосфере получило в трудах русских ученых М. М. Камшилова и Н. Н. Моисеева. Развивая теорию ноосферы, М. М. Камшилов отмечал, что «на наших глазах совершается революционный переход от эволюции, управляемой стихийными биологическими факторами (период биогенеза), к эволюции, управляемой сознанием, к периоду ноогенеза» [3, с. 232].

Под эпохой ноосферы Н. Н. Моисеев понимал эпоху, когда коллективный разум и коллективная воля достигнут высокого значимого уровня, достаточного, чтобы обеспечить гармоничное совместное развитие природы и общества [5]. В настоящее время достаточно широко используется термин «устойчивое развитие». По мнению академика Н. Н. Моисеева, «устойчивое развитие» – это стратегия переходного периода к такому состоянию общества и природы,

которое и именуется ноосферой. Это развитие общества, приемлемое для сохранения экологической ниши человека и выживания цивилизации. Поскольку экологической нишей человечества является вся биосфера, понятие «устойчивое развитие» он трактует как совместную, скоординированную эволюцию (коэволюцию) человека и биосферы. Разработка стратегии устойчивого развития – первый шаг к эпохе ноосферы. Поэтому Моисеев сформулировал **экологический** и **нравственный императивы**. Под экологическим императивом он понимал совокупность тех ограничений в активной деятельности людей, нарушение которых уже в ближайшие десятилетия может обернуться для человечества самыми катастрофическими последствиями. Однако он считал, что экологического императива недостаточно. Необходимо дополнить понятие устойчивого развития нравственным императивом, то есть необходимо ограничить деятельность человека новыми нравственными принципами. «Самое главное, – писал он, – должна быть изменена шкала ценностей, я имею ввиду переход от общества потребления к обществу творчества, как я бы назвал еще по-другому, к экологическому социализму» [6].

Идеи В. И. Вернадского, развитые в работах М. М. Камшилова и Н. Н. Моисеева, находят отклики в работах многих авторов. Однако большинство ученых, проводящих исследования в данной области, рассматривают в основном нравственно-философские аспекты проблемы перехода биосферы в новое состояние – ноосферу. Так, Н. В. Попкова считает, что «научно-техническая база для создания ноосферной системы существует» [7, с. 224]. Так ли это?

В эпоху ноосферы функционированием биосферы должен управлять человеческий разум. Известно, что биосфера – это самый сложный биогеохимический объект, поэтому устройство управ-

ления этим объектом также будет достаточно сложным. Сложные системы управления изучает кибернетика (греч. *kybernetike* – искусство управления), поэтому, на наш взгляд, будет правомерно рассмотреть вопросы управления биосферой с точки зрения этой науки.

В современном понимании «система управления» представляет собой совокупность управляющих устройств и объекта управления. При этом **управление** – это совокупность действий, направленных на обеспечение функционирования объекта управления.

Любой объект управления имеет **алгоритм функционирования** – предписание, устанавливающее порядок (последовательность) тех или иных операций, обеспечивающих устойчивую работу этого объекта. Объект функционирует в условиях внешних воздействий на него, которые препятствуют правильному и эффективному выполнению заданного алгоритма функционирования. Поэтому возникает необходимость в специальных воздействиях на объект управления, направленных на устранение или компенсацию отрицательных внешних воздействий. Эти воздействия вырабатывает управляющее устройство уже по своему алгоритму, называемому **алгоритмом управления**. Таким образом, **алгоритм управления** – это совокупность правил, определяющих характер внешних воздействий на объект управления. Очевидно, что алгоритм управления зависит от свойств объекта управления и алгоритма его функционирования.

Объект управления, в данном случае биосфера, функционирует под влиянием приложенных к нему воздействий, которые делятся на возмущающие и управляющие. Возмущающие воздействия вызывают отклонения выходных показателей объекта управления от требуемых значений, а управляющие воздействия предназначены для компенсации этих отклонений. Любое воздействие может

происходить в трех формах: энергетической, метаболической и информационной. Энергетическая форма проявляется в процессах преобразования и передачи энергии, метаболическая – в процессах преобразования и передачи вещества. Информационная форма заключается в том, что при энергетических и метаболических воздействиях имеет место передача информации [8, с. 8–34].

Рассмотрим функционирование биосферы как объекта управления с учетом основных положений кибернетики. Очевидно, что биосфера имеет алгоритм функционирования, в противном случае ее существование было бы невозможным. К основным положениям этого алгоритма следует отнести процесс передачи и преобразования энергии, вещества и информации. В биосфере такая последовательность известна – от продуцентов к консументам, а затем к редуцентам; в экологии она называется круговоротом веществ. Биосфера стремится к расширению и увеличению мощности этих процессов, а устойчивый круговорот веществ в биосфере возможен при определенном соотношении численности организмов. Если этот процесс остановить, то биосфера прекратит существование. По сути, об этом говорил и В. И. Вернадский в своих знаменитых работах.

Поскольку биосфера является открытым объектом, то подвергается внешним воздействиям, которые в кибернетике называют возмущающими. Возмущающие воздействия поступают в биосферу из космоса (космическое и солнечное излучения, пыль, метеориты и астероиды), а также формируются на Земле (извержения вулканов, землетрясения и другие стихийные явления). К возмущающим воздействиям следует отнести и результаты деятельности человека – разрушение природных экосистем и создание антропогенных, загрязнение окружающей среды, уменьшение видового разнообразия живых организмов и т. д.

Известно, что биосфера в определенной степени является саморегулируемой системой. До недавних пор, пока человечество не стало «крупнейшей геологической силой», биосфера успешно справлялась с возмущающими воздействиями и восстанавливала свое равновесие. Рассмотрим этот процесс саморегуляции на примере стихийного бедствия. Иногда в результате пожара выгорают огромные участки леса. Уже через год появляется трава, затем молодая поросль деревьев и начинается процесс восстановления экосистемы. На наш взгляд, это происходит по следующим причинам. Во-первых, благодаря способности организмов, входящих в состав экосистемы, воспроизводить себе подобных. Во-вторых, организмы, особенно низшие, в возможностях воспроизводства обладают большой избыточностью. Благодаря такой избыточности и при наличии комплекса благоприятных экологических факторов время захвата всей поверхности Земли, например, диатомовыми водорослями составляет всего 16,8 суток.

Важную роль в процессе саморегуляции играют вирусы и патогенные (болезнетворные) бактерии, вызывающие многочисленные заболевания организмов и снижающие численность популяций. Установлено, что одни и те же вирусы у организмов одного вида вызывают заболевания, а для других они безвредны. Избирательность воздействия позволяет регулировать численность только тех популяций, которые нарушают стабильность экосистемы.

Рассмотренные примеры, конечно же, не охватывают всего разнообразия алгоритмов функционирования экосистем и всей биосферы в целом. Однако с полной уверенностью можно сказать, что биосфера является достаточно сложной кибернетической системой, содержащей объект управления с соответствующим алгоритмом функционирования и внутренние механизмы само-

регулирования со своими алгоритмами управления.

Вместе с тем алгоритм функционирования биосферы известен лишь в общих чертах, достаточно полный алгоритм пока не установлен. До конца не ясны и математически не описаны внутренние механизмы саморегуляции и их алгоритмы управления.

Таким образом, человеческий разум должен управлять достаточно сложным саморегулируемым объектом — биосферой. Для этого, исходя из рассмотренных принципов кибернетики, какой-то орган управления должен оказывать на биосферу управляющие воздействия на основе алгоритма управления с целью компенсации возмущающих воздействий. Даже в общих чертах непонятно, как технически осуществлять управление биосферой, какие материальные и энергетические ресурсы для этого необходимы.

Поэтому на основе проведенного анализа можно сказать, что научно-технические проблемы преобразования биосферы в ноосферу в настоящее время находятся лишь на уровне постановки вопроса.

Для оценки негативных возмущающих воздействий человека на биосферу рассмотрим исторический путь становления человека и общества. На определенном этапе развития биосферы появился первобытный человек. Он незаметно вписался в биосферу, так как не был ни самым сильным, ни самым быстрым, ни самым ловким среди земных обитателей. Как же случилось, что человек подчинил своим нуждам значительную часть биосферы? По каким-то причинам после нескольких миллиардов лет развития жизнь на Земле стала *разумной*. Видимо, под воздействием внешних возмущений произошли изменения в генной структуре ДНК (ДНК — дезоксирибонуклеиновая кислота) пра-человека таким образом, что, выражаясь терминами кибернетики, у человека

появились зачатки *саморазвивающегося интеллекта*.

Существенным шагом в развитии человека явился переход к изготовлению орудий труда: дубинка усилила руку, обработанный камень заменил клык. Эволюция человека постепенно сменяется эволюцией создаваемых им орудий труда: биологическая эволюция – эволюцией технической. Это уже *Homo habilis* – *Человек умелый*. При этом человек еще не оторвался от остального живого мира, он стал лишь *первым среди равных*. Род его процветает, популяция растет, и люди заселяют уже весь земной шар. Причиной глобального расселения была нехватка продуктов питания в границах прежнего ареала.

Расселение первобытных людей по территории всей планеты можно сравнить с эпохой великих географических открытий. Около 10...15 тыс. лет назад человек полностью заселил современный ареал обитания, кроме Антарктиды, которая и тогда была покрыта льдами. Это было небывалое в истории Земли расселение биологического вида, который сумел приспособиться к различным климатическим и погодным условиям.

Новый этап материальной культуры связан с появлением *Homo sapiens* – *Человека разумного*. Однако всегда ли разумными были его действия? Человек захватил всю сушу. Он уже не первый среди равных, он возвышается над всем живым миром как *диктатор*. Для поддержания и роста популяции необходимо все больше и больше пищи. В результате в Европе были полностью уничтожены мамонт, степной зубр, гигантский олень, шерстистый носорог, пещерные лев и медведь, в Америке – мамонт, мегатерий, верблюд и другие виды животных. Это была первая крупная экологическая ошибка человека. Неумеренное уничтожение крупных животных в конечном итоге привело к уменьшению пищевой базы и сокращению численности людей почти вдвое. Произошел *пер-*

вый экологический кризис.

Человек находит спасительный выход из создавшегося положения в принципиально новом способе добычи пищи – в ее производстве (около 8...10 тыс. лет назад). Вместо собирательства плодов и корешков вводится земледелие, а вместо охоты – скотоводство. Наступил новый этап взаимодействия человека с окружающей природой. Выгоды нового способа жизнеобеспечения были очевидны, поскольку скотоводство и земледелие давали более гарантированную пищу в течение года. Выросла производительность труда, и освободившееся время человек использует на улучшение своего быта. Он уже сам строит для себя жилище, производит одежду, обувь, посуду, украшения – возникает понятие собственности.

Преимущества этих нововведений, прямые выгоды были очевидны сразу, а скрытая опасность стала заметна намного позже. Суть ее в том, что нарушался баланс природных процессов. С появлением стад, отар, табунов домашних животных травы выедались и вытаптывались быстрее и уже не успевали восстанавливаться в прежнем объеме. Луга и степи стали превращаться в полупустыни, а полупустыни – в пустыни.

Аналогичные процессы происходили и в земледельческом хозяйстве. Тогда практиковалось подсечно-огневое земледелие: участок леса предварительно валили (подсекали), подсушивали и сжигали, полученная в результате зола использовалась в качестве удобрений. Такое поле 2...3 года давало неплохой урожай, но затем его использование становилось нерентабельным. Еще несколько лет оно служило пастбищем, а затем забрасывалось. Выжигали следующий участок леса, и все повторялось снова.

Кроме того, монокультуры, выращиваемые человеком, создавали и создают до сих пор прекрасные условия для питания насекомых, грызунов. Так,

сельское хозяйство, вооруженное современными средствами защиты растений, до сих пор не может справиться с колорадским жуком и саранчой. Интенсивная хозяйственная деятельность человека приводила и к изменению природных условий: засолению и эрозии почвы, опустыниванию и в конечном итоге к деградации антропогенных (созданных человеком) экосистем.

Изобретение во второй половине XVIII в. английским механиком Д. Уаттом парового двигателя положило начало индустриальной эпохе. Машины и механизмы начали проникать во все сферы деятельности человека. Потребление энергии начало быстро возрастать. Например, в Англии в первой половине XIX в. потребление энергии на одного человека в сутки составило около $3,2 \cdot 10^5$ кДж (примерно 90 кВт·ч). В разгар промышленной революции (1850) энергопотребление человечества достигло $(2-2,1) \cdot 10^{16}$ кДж/г. Человечество начало создавать искусственную среду обитания – **техносферу**. В экологическом энциклопедическом словаре дано следующее определение этого понятия: «Техносфера (греч. *techne* – искусство, мастерство и *sphaira* – сфера, шар) – часть биосферы, преобразованная людьми с помощью прямого и косвенного воздействия технических средств в целях наилучшего соответствия социально-экономическим потребностям человечества» [4, с. 313].

К началу XX в. общая численность населения нашей планеты превысила 1,6 млрд человек, а суммарное энергопотребление достигло $3,4 \cdot 10^{16}$ кДж/г. Прошедший век характеризуется резким ростом как суммарного, так и удельного энергопотребления. В 2008 г. население превысило 6,7 млрд человек, суммарное энергопотребление достигло $6,9 \cdot 10^{17}$ кДж/г., а удельное энергопотребление – $10,7 \cdot 10^7$ кДж/(г·чел.). Для сравнения первобытный человек потреблял примерно $4,2 \cdot 10^3$ кДж/(г·чел.). Приведен-

ные цифры говорят о том, что в XX в. произошел не только «демографический взрыв», но и «**энергетический взрыв**».

Бурное создание техносферы породило множество экологических проблем. Качественный скачок науки и техники в XX столетии привел к тому, что антропогенные воздействия на биосферу стали сопоставимы с природными экологическими факторами. Преобразования природных ландшафтов в города, промышленные комплексы и сельскохозяйственные системы охватили около 20 % суши. Антропогенный расход кислорода достиг 10 % от получаемого кислорода при фотосинтезе. В некоторых странах (США, ведущие страны Западной Европы) техногенное потребление кислорода стало превышать его производство растениями, расположенными на территории этих стран. Всемирная встреча на высшем уровне по устойчивому развитию, санкционированная ООН и состоявшаяся в Йоханнесбурге в августе–сентябре 2002 г., отметила дальнейшее обострение проблемы нищеты и ухудшение экологической обстановки.

В. И. Вернадский в первой половине прошлого века по этому поводу писал: «Долгие десятки тысяч лет косное вещество биосферы затрагивалось человеком лишь в степени, несравнимой с резким изменением окружающей его живой среды. Создался в результате этой работы новый лик Земли. ... Сейчас изменение проявляется все более резко с каждым десятилетием» [1, с. 228].

В результате сложилась парадоксальная ситуация: современная цивилизация достигла небывалых высот и в то же время оказалась на краю пропасти. Экологические проблемы в современном мире стали особенно острыми и вышли на первое место. Приобретая неограниченную власть над природой, люди поварварски используют ее ресурсы.

При этом возникает один наиваж-

нейший вопрос: почему же человек так поступает?

Не претендуя на истину в первой и даже во второй инстанции, попытаемся дать ответ. Если принять точку зрения эволюционистов о самозарождении жизни из неживой материи и постепенном совершенствовании живых форм, то невольно приходишь к мысли: эволюция свернула на тупиковую ветвь. Венец эволюционного развития – человек – успешно разрушает уникальное явление во Вселенной – биосферу Земли, т. е. тот дом, где он впервые появился, жил и пока продолжает жить.

Достаточно сложно объяснить действия человека и с позиции креационистов (лат. *creatio* – создание), считающих, что жизнь была создана сверхъестественным образом. Непонятно, почему Творец создал человека-разрушителя? С этой точки зрения появление Христа как спасителя человечества является весьма обоснованным. Но в целом надо сказать, что человечество не прислушалось к его проповедям. Особенно это относится к «золотому миллиарду» населения Земли, основу которого составляют христиане.

Сегодня в массовом сознании прочно утвердился идеал, к которому стремится большинство людей мира. Это идеал материального благополучия. Для жителей государств «золотого миллиарда» – это уровень жизни мультимиллионера с собственными яхтами, самолетами, виллами и даже собственными островами, для жителей остальных стран – это уровень жизни, достигнутый представителями среднего слоя западных стран. Такая философия усиленно насаждается американскими и западноевропейскими средствами массовой информации, а в последнее время – и российскими. Построение и развитие общества потребления стало глобальной идеей, к сожалению, овладевшей массами. Вместе с тем это глобальная фикция, самый грандиознейший обман в истории чело-

вечества. Следование по этому пути способно привести к разрушению цивилизации.

Во-первых, рост уровня потребления неизбежно ведет к увеличению вредных выбросов в окружающую среду. Так, на долю США приходится почти половина всех вредных выбросов на планете, хотя там проживает менее 5 % населения Земли. Следует отметить, что развитые страны дают более 75 % всех вредных выбросов, хотя в этих странах, как ни странно называемых «цивилизованными», тратятся огромные средства на их очистку и утилизацию.

Во-вторых, наша планета имеет конечные размеры и, соответственно, объем природных ресурсов не является бесконечным. Запасы полезных ископаемых сокращаются значительно быстрее, чем прогнозировалось ранее. По оценкам крупнейших ученых мира – экспертов ООН – нынешний образ жизни приведет через 70...100 лет к исчерпанию ряда важнейших ресурсов, необходимых для жизнеобеспечения людей, таких как нефть, природный газ, чистая пресная вода и чистый воздух.

В 1976 г. крупнейший русский ученый XX в. лауреат Нобелевской премии П. Л. Капица, выступая перед учеными Англии, привел перечень важнейших проблем, от решения которых зависит судьба цивилизации. К ним он отнес рост народонаселения, потребности в энергоресурсах, потребности в промышленном сырье и рост загрязнения окружающей среды.

Всестороннее математическое исследование этих проблем проведено группой крупнейших ученых мира, которая известна под названием «Римский клуб». **Римский клуб** (Club of Rome) – международная неправительственная организация, деятельность которой направлена на изучение глобальных проблем. Основана в 1968 г. итальянским менеджером и общественным деятелем А. Печчеи.

Работы Римского клуба начались с анализа взаимоотношений общества и окружающей среды. Первую работу в рамках Клуба провел американский специалист по компьютерному моделированию Дж. Форрестер, профессор прикладной информатики и кибернетики Массачусетского технологического института. Результаты его исследования, опубликованные в книге «Мировая динамика» (1971), предполагали, что продолжение прежних темпов потребления природных ресурсов приведет в 2020-х гг. к всемирной экологической катастрофе. Для предотвращения такой катастрофы Форрестер предлагал модель «глобального равновесия»: необходимо затормозить прирост населения земли и установить его численность к концу XX в. на уровне 4,5 млрд человек. В его модели явно видны идеи, почерпнутые из книги «Опыт о законе народонаселения» Т. Мальтуса, согласно которым рост продуктов питания происходит в арифметической прогрессии, а на-

родонаселения – в геометрической.

Группа ученых под руководством Денниса Медоуза продолжила и углубила работу Форрестера. Ими было разработано несколько моделей, построенных на экстраполяции наблюдающихся тенденций роста населения и истощения известных запасов природных ресурсов («Пределы роста», 1972). Первой была исследована «стандартная» модель, сущность которой можно выразить следующим выражением: «Что произойдет, если ничего не предпринимать» (рис. 1). Анализ этих результатов производит устрашающее впечатление. После 2030 г. быстро наступит критическая ситуация. Из-за уменьшения ресурсов произойдет резкое снижение промышленной продукции и продуктов питания на одного человека, затем, примерно, к 2050 г. – быстрое уменьшение населения. Как общее следствие этого процесса, начнется уменьшение загрязнения окружающей среды.

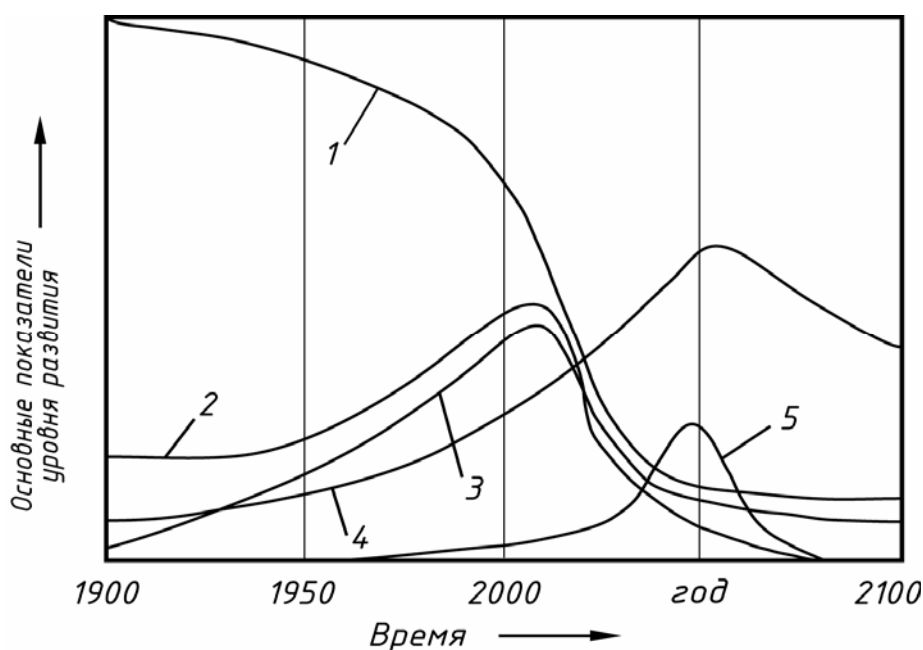


Рис. 1. Теоретическая модель развития цивилизации при сохранении достигнутых темпов развития: 1 – ресурсы; 2 – продукты питания на душу населения; 3 – численность населения; 4 – промышленное производство на душу населения; 5 – загрязнение окружающей среды

Кроме того, исследована модель при количестве ресурсов, удовлетворяющем растущие потребности человечества, и неконтролируемом загрязнении окружающей среды. В этом случае из-за резкого роста загрязнения возможно разрушение цивилизации к концу 2100 г. При контроле за загрязнением процесс разрушения цивилизации откладывается на 1...2 столетия. Единственным выходом из катастрофической ситуации виделся переход к планируемому в мировом масштабе развитию по модели **глобального равновесия** (фактически – «нулевого роста»), т. е. сознательная консервация промышленного производства и численности населения.

Эти первые работы вызвали острую дискуссию как среди обществоведов, так и среди политиков. Особенное несогласие высказали экономисты. Они указывали, что НТР не только ускоряет потребление невозобновляемых ресурсов и загрязнение окружающей среды, но и стимулирует освоение новых ресурсов, внедрение ресурсосберегающих и экологически чистых технологий. В работе «Будущее мировой экономики» (1976) известный экономист В. Леонтьев подчеркивал, что «рост населения – не экспоненциальный процесс и не экспоненциальный взрыв». Он утверждал, что в развитых регионах мира темпы прироста населения будут падать и стабильный уровень численности будет достигнут после 2025 г. В странах «третьего мира» стабилизация произойдет к 2075 г. в результате не голода, а демографических изменений, связанных с относительно высоким уровнем экономики.

Моделирование развития цивилизации было продолжено. В работе «Человечество у поворотного пункта» М. Месарович и Э. Пестель (1974) усовершенствовали компьютерную модель развития мировой экономики, рассмотрев также развитие основных регионов

планеты. Они пришли к выводу, что при сохранении существующих тенденций серия региональных катастроф произойдет даже раньше, чем полагали Форрестер и Медоуз. Однако «стратегия выживания», по их мнению, состоит не в достижении «состояния глобального равновесия», а в переходе к **органическому росту** – системному взаимозависимому развитию различных частей мировой системы, в результате чего можно достигнуть сбалансированного развития всего человечества. Эта позиция нашла продолжение в работе «За пределами роста» Э. Пестеля (1988). Важно отметить, что обе модели – и «глобального равновесия», и «органического роста» – предполагали отказ от стихийного саморазвития в пользу сознательного регулирования.

Под влиянием критики прогнозов глобальной экологической катастрофы разработчики дальнейших исследований стали делать основной акцент не на описании грядущих угроз, а на анализе путей их предотвращения. Авторы работы «Фактор четыре: удвоение богатства, двукратная экономия ресурсов» (1997) Э. Вайцеккер, Э. Ловинс и Л. Ловинс, проанализировав развитие ресурсосберегающих технологий, пришли к выводу, что вместо глобальной катастрофы после 2050 можно ожидать одновременной стабилизации численности населения и промышленного производства при снижении уровня загрязнения окружающей среды.

Аналогичные исследования проводились и советскими учеными. Еще до выхода работ «Мировая динамика» и «Пределы роста» в 1968 г. в «Научных трудах Обнинского отдела Географического общества СССР» была опубликована статья «Биосфера и человечество» выдающегося ученого-генетика Н. В. Тимофеева-Ресовского, в которой автор предлагает решать проблемы роста на-

роданаселения путем повышения продуктивности биосферы. Он писал: «Однако, рассмотрев то, что происходит в биосфере, и то, что мы уже знаем благодаря работам наших крупнейших ученых Вернадского, Сукачева и ряда других, мы приходим к оптимистическому прогнозу: не в 2, а в 10 с лишним раз человек может повысить продуктивность Земли, не подорвав производительных сил ее биосферы».

Важная работа в этом направлении в середине 70-х гг. XX в. была сделана группой исследователей Института прикладной математики АН СССР под руководством В. А. Егорова. Они доказали, что концепция «равновесной» цивилизации не предотвращает кризис, а лишь отодвигает его на 2...3 столетия. В качестве альтернативы они предложили концепцию развития, при которой значительная часть инвестиций направляется на борьбу с загрязнением окружающей среды, на восстановление ресурсов и ликвидацию эрозии обрабатываемых земель. По сути, они предложили установить на нашей планете режим космического корабля в неограниченно длительном плавании, когда все ресурсы должны регенерироваться и загрязнение окружающей среды должно быть сведено если не к нулю, то к очень незначительной величине. На эти «планетосберегающие» технологии должны идти весьма ощутимые отчисления от общего капитала.

Прошло более 30 лет с начала работы Римского клуба. Сегодня есть некоторая возможность сравнить теоретические результаты с реальным состоянием дел на 2008 г. Несмотря на огромный интерес во всем мире к разработкам ученых в этой области, экономика большинства стран продолжает ориентироваться на решение краткосрочных задач и получение быстрых выгод. Увеличивается потребление невозобнов-

ляемых ресурсов, меняется климат, учащаются глобальные природные катастрофы. Пока реальная действительность больше всего соответствует «стандартной» модели. Так, по народонаселению реальные показатели даже выше прогнозных на 34 %. Выбросы загрязнителей в окружающую среду также выше расчетных значений.

«Мир никогда не сможет уменьшить экологическую нагрузку до устойчивого уровня, если эти попытки не будут основаны на глобальном партнерстве. Катастрофа неизбежна, если люди не научатся относиться к себе и другим как к частичкам единой глобальной системы», – пишут авторы книги «Пределы роста. 30 лет спустя» (Донелла Медоуз, Йорген Радерс, Деннис Медоуз, 2004) [9].

Человечество, возникшее как часть биосферы, вышло из состояния равновесия с живой оболочкой Земли, так как неограниченный экспоненциальный рост всех показателей развития за последние 2...3 столетия есть неравновесный процесс. «В настоящее время потоки энергии и веществ через земные экосистемы приблизительно на 20 % превышают уровень, который мог бы обеспечивать их устойчивое функционирование. То есть биосфера под воздействием человека уже перегружена на 20 %. Поэтому необходимо эти потоки уменьшать. И уменьшение может произойти двумя путями: либо человечество осознает проблему и сознательно уменьшит потоки разных веществ, либо мы игнорируем эти факты, и тогда произойдет кризис. В случае, если эти изменения будут проигнорированы, возрастет смертность и резко упадет уровень жизни на всей планете. Первоначальный толчок к этим ухудшениям произойдет из-за ухудшения качества окружающей среды и продуктов питания. То есть будет ухудшено качество почвы, следова-

тельно, будет увеличено использование искусственного удобрения, что позже повлияет на сами продукты питания», – сказал Деннис Медоуз в интервью российским журналистам.

Глава Международной Конвенции «Хартия Земли» А. Аткиссон утверждает, что модель Денниса Медоуза показала вещи, ставшие очевидными ему более 30-ти лет назад:

– наша Земля рассчитана максимум на 2 млрд человек, в то время как нас уже к 2020 г. будет больше 9 млрд;

– нагрузка людей на биосферу уже составляет 125 % из возможных 100 %.

Исследования, проведенные авторами, показывают, что биосфера после истощения угля нефти и природного газа без ущерба для биотических циклов может обеспечить энергией примерно 1,7 млрд человек [10].

Современная высокоразвитая технологическая цивилизация потеряла способность к саморегенерации, которой обладали более примитивные древние и средневековые общества. Если она рухнет в результате какого-либо катаклизма, то восстановить ее будет практически невозможно. Даже если человечество при этом выживет, оно не сможет вернуться назад, поскольку большинство запасов основных полезных ископаемых уже истощено до такой степени, что для их добычи потребуются сложные технологии, требующие металлоемкого оборудования и огромных энергозатрат. В случае гибели современной цивилизации новая сможет быть только аграрной, но никогда не станет промышленной. По сравнению с таким будущим качество жизни современного периода гораздо выше, и, возможно, конец XX в. будет признан впоследствии «золотым».

Таким образом, процесс перехода биосферы в ноосферу в настоящее время пока не имеет научно-технической

основы. Эти исследования находятся лишь в стадии постановки вопроса.

Подводя итог, необходимо отметить, что у современной цивилизации есть два пути развития: 1) человечество будет продолжать наращивать добычу полезных ископаемых, неуклонно совершенствуя общество потребления; 2) человечество перейдет к новому типу цивилизации, в котором его потребности не будут выходить за рамки возможностей биосферы. В первом случае человечество ожидает острая борьба за ресурсы, скорее всего с применением силы, общепланетарный экологический кризис и в конечном счете деградация человека как биологического вида.

Второй путь основывается на гипотезе о том, что человечество сможет опереться на свой коллективный разум и найти пути создания общества, способного к согласованной эволюции с биосферой, т. е. сможет перейти в эпоху ноосферы. Для этого необходимо решить как научно-технические, так и нравственно-философские задачи преобразования биосферы в ноосферу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большой Российский энциклопедический словарь. – М. : Большая Российская энциклопедия, 2006. – 1887 с.
2. **Вернадский, В. И.** Биосфера и ноосфера / В. И. Вернадский. – М. : Наука, 1989. – 261 с.
3. **Камшилов, М. М.** Эволюция биосферы / М. М. Камшилов. – М. : Наука, 1979. – 256 с.
4. **Дедю, И. И.** Экологический энциклопедический словарь / И. И. Дедю. – Кишинев : МСЭ. – 408 с.
5. **Моисеев, Н. Н.** Системная организация биосферы и концепция коэволюции / Н. Н. Моисеев // Общественные науки и современность. – 2000. – № 2. – С. 123–130.
6. **Моисеев, Н. Н.** Естественнонаучное знание и гуманитарное мышление / Н. Н. Моисеев // Общественные науки и современность. – 1993. – № 2. – С. 63–75.
7. **Попкова, Н. В.** Гуманитарная революция как путь к сотворению ноосферы / Н. В.

Попкова // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2004. – № 1. – С. 219–229.

8. **Ксенович, И. П.** Теория и проектирование автоматических систем : учебник для студентов вузов / И. П. Ксенович, В. П. Тарасик. – М. : Машиностроение, 1996. – 480 с.

9. **Медоуз, Д.** Пределы роста. 30 лет спустя / Д. Медоуз, Й. Радрерс. – М. : Академкнига,

2007. – 342 с.

10. **Галюжин, С. Д.** Энергетическая проблема цивилизации / С. Д. Галюжин, Д. С. Галюжин, О. М. Лобикова // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2005. – № 3. – С. 85–90.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 10.02.2009

S. D. Galyzhin, D. S. Galyzhin, O. M. Lobikova
Biosphere or technosphere?

Analysis processes and problems of turn biosphere into technosphere. Show that scientific and technical tasks such turn was in stage formulation of the question. Make that modern civilization two way of development: either humanity were continue in crease extraction useful minerals, steadfastly perfection society of consumption or turn into new type civilization in which has requirements was not go over verge for possible means of biosphere.

УДК 621.311.23; 628.544

**В. Н. Соловьев, канд. техн. наук, Л. А. Бида, канд. техн. наук, Н. Д. Кузьмина,
Г. И. Фокина, А. С. Левчук, И. Г. Плещанков, Л. И. Хилько**

ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗИФИКАЦИИ МЕСТНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

Проведена отработка технологии газификации местных видов топлива на крупномасштабной макетной газогенераторной установке. Изучены технологические параметры обращенного процесса газификации при избыточном давлении, характеристики топлива и подовой золы, химический состав газовой фазы; отработан безопасный режим работы; проведена многократная доработка конструкции с целью оптимизации процесса. Проведенный цикл исследований позволил создать опытные образцы газогенераторов типа ГДО мощностью 100 и 200 кВт, а также экспериментальный автономный энергоисточник в составе газогенераторной установки и мини-котельной на генераторном газе мощностью 0,2 МВт.

Введение

Термохимическая газификация представляет собой процесс частичного окисления углеродсодержащего сырья, такого как биомасса, торф и уголь, с получением газообразного энергоносителя – генераторного газа. Преимуществом газификации по сравнению с прямым сжиганием является образование намного меньших объемов отходящего газа, подвергаемого очистке, вследствие чего система очистки может быть более компактной и экономичной. Кроме того, управление процессом горения генераторного газа легче, чем процессом горения биомассы [1]. При этом технико-экономические показатели сжигания топлива в топках выше по сравнению с такими же показателями газификации и пиролиза. Однако довольно часто может возникать необходимость решения локальных энергетических проблем с использованием газогенераторов для получения газа как топлива, например, в ДВС-циклах, а также синтез-газа с последующим его обогащением водородом [2]. В зависимости от способа использования генераторного газа к нему предъявляются различные требования по уровню содержания твердых частиц, смол, хлора, щелочных металлов [3].

При наличии отходов деревообработки за счет производственной дея-

тельности предприятия применение газогенераторной установки становится рентабельным [4]. Кроме того, в зависимости от мощности такой установки ее эксплуатация и техническая оснащенность могут быть достаточно простыми, что значительно снизит срок окупаемости капитальной составляющей затрат. В случае использования комплексных газогенераторных установок на загрязненных радионуклидами территориях срок окупаемости существенно сокращается за счет получения дополнительной деловой древесины и участия в реабилитационных мероприятиях. Энергию, содержащуюся в полученном при газификации генераторном газе, можно использовать либо в качестве тепловой энергии при сжигании газа в котельной топке, либо для другого теплового процесса (отдельно или при совместном сжигании), либо для получения механической энергии с целью выработки электроэнергии в газовых двигателях или газовых турбинах. Возможно также применение генераторного газа в процессе синтеза метана или в топливных элементах [5].

Физико-химические процессы при газификации отходов сохраняются такими же, как и при использовании таких видов топлива, как уголь, кокс, древесина. Тем не менее для каждого конкретного нетрадиционного вида топлива

требуются отработка технологии его газификации и доработка газогенератора с учетом специфических особенностей топлива. Могут возникнуть также некоторые сложности инженерного характера при эксплуатации систем топливоподачи, систем золоудаления с учетом возможного шлакования золы и др.

В настоящей работе представлены результаты комплекса исследований по отработке технологических параметров обращенного процесса газификации, системы подачи топлива в газогенератор и системы золоудаления, разработке и внедрению оборудования по использованию большинства местных топливных ресурсов как возобновляемых источников энергии. При этом изучались следующие характеристики топлива: фракционный состав, влажность, зольность древесного топлива; дисперс-

ность, химический состав подовой золы, содержание углерода; дисперсность летучей золы; химический состав отходящих газов, содержание в них смолистых и механических примесей.

Основная часть

Для отработки технологических параметров процесса газификации различных видов местного топлива за основу была выбрана схема с газогенератором обращенного процесса под давлением и создан испытательный стенд (рис. 1), состоящий из газогенератора 1 (типа ГДО) с золосборником в виде ванны гидрозатвора 5, дутьевого вентилятора 10, узла газоочистки (газовый циклон 11). Для исключения сброса окиси углерода в атмосферу предусмотрена камера сгорания 14 с горелкой 16.

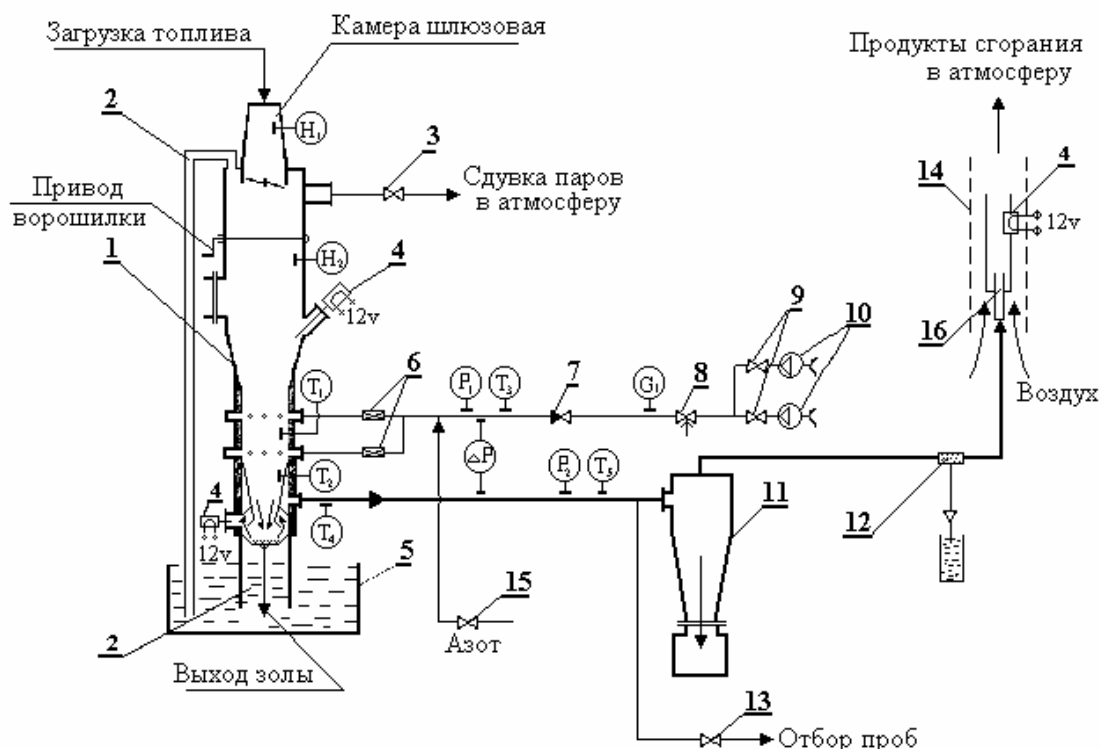


Рис. 1. Схема испытательного стенда газогенераторов: 1 – газогенератор; 2 – гидрозатворы; 3, 8, 9, 13, 15 – запорно-регулирующая арматура; 4 – электрозапальник; 5 – ванна гидрозатвора; 6 – устройство дроссельное; 7 – клапан обратный; 10 – вентилятор дутьевой; 11 – циклон газовый; 12 – клапан огнепреграждающий насыпного типа; 14 – камера сгорания; 16 – горелка

Газогенератор снабжен предохранительным устройством 2, выполненным в виде гидрозатворов. С целью предотвращения возможности образования взрывоопасных концентраций в полости газогенератора предусмотрены линия подачи азота 15 и обратный клапан 7. Розжиг газогенератора осуществляется с помощью электрозапальника 4.

Схема предусматривает необходимый контроль технологических параметров. К основным параметрам работы установки относятся температура в зоне горения, температура генераторного газа, расход топлива, расход дутьевого воздуха, давление в аппарате. В зависимости от конструктивных особенностей газогенератора соответственно корректировалась и схема обвязки аппарата.

Отработка технологии газификации на газогенераторе ГДО-50

Исследования проводились на различных видах местного топлива. После каждой серии опытов анализировались полученные результаты, на основании которых проводилась необходимая доработка конструкции с целью оптимизации процесса. На установке с макетным образцом газогенератора ГДО-50 мощностью 100 кВт были отработаны обращенный процесс газификации, конфигурация и геометрические размеры реакционной зоны, конструкция и характеристики подвижной колосниковой решетки, загрузочное устройство топлива, системы безопасности.

На начальном этапе исследований газификация проводилась на газогенераторе с рекуперативным подогревом дутьевого воздуха (до 60...90 °С) и подачи его на верхние слои топлива без организованной раздачи по сечению шахты. Дутьевой воздух проходил через весь слой топлива сверху вниз до зоны горения. Газификацию осуществляли в обращенном процессе при одноразовой загрузке топлива в газогенератор. Топливо состояло из неокоренных кусков

древесины березы и сосны размером 35×35×10 мм, влажностью 6,7 %, зольностью 0,74 %. Параметры работы: начальная высота слоя топлива – 0,8 м; плотность укладки – 220 кг/м³; расход воздуха на дутье – 10...40 м³/ч; избыточное давление в газогенераторе – 4,5...6 кПа.

Результаты первой серии экспериментов показали, что процесс газификации требует более тщательной оптимизации, так как полученный генераторный газ по содержанию смол близок к генераторному газу прямого процесса (CO – 17...23 %; CH₄ – до 3,8 %; H₂ – до 1 %; содержание смол – 96...170 г/нм³). При этом достаточно большой оставалась степень недожога (содержание углерода в золе до 90 %), а температура процесса была невысокой (в пределах 600...650 °С). Повышенное содержание в газе двуокиси углерода (около 17 %), а также нехарактерно низкое для древесины содержание окиси углерода (17...23 %) указывает на то, что процесс газификации не является оптимальным. Это происходит из-за того, что при такой схеме и принятых размерах топлива фронт горения поднимается навстречу потоку воздуха по слабо заполненным топливом направлениям, что не дает возможности образоваться необходимому слою углей для конверсионных процессов. Такое конструктивное исполнение аппарата практически неприемлемо для проведения обращенного процесса газификации взятого типоразмера топлива.

После анализа результатов сделан вывод, что схема подачи дутьевого воздуха на верхние слои топлива не обеспечивает желаемые показатели состава генераторного газа. После организации дутья непосредственно в зону газификации введением дутьевого патрубка в зону горения достигнута температура процесса 900...1000 °С, содержание углерода в золе снизилось до уровня 50...60 %, получены приемлемые показатели состава генераторного газа. Практически был получен генератор-

ный газ обращенного процесса:

$\text{CO}_2 - 7...10\%$; $\text{CO} - 30...35\%$;
 $\text{CH}_4 - 1...2\%$; $\text{H}_2 - 0,5...0,6\%$;
 $\text{N}_2 - 59...62\%$; $\text{O}_2 - 1,5\%$;
 содержание смол – 21 г/нм^3 .

Теплотворная способность сухого газа, рассчитанная с учетом экспериментально полученного состава газа, составила $4190...5028 \text{ кДж/нм}^3$. Низкое содержание водорода можно объяснить применением древесины с малым содержанием влаги.

Полученные результаты показали, что следует выполнить организованную раздачу дутьевого воздуха в зоне горения, увеличить высоту реакционной зоны, изменить ее геометрию, а также доработать колосниковую решетку. Необходимо отметить, что во время запуска аппарата наблюдались «хлопки». Имевшийся под колосниковой решеткой гидрозатвор как защитный элемент недостаточно эффективно смягчал эти «хлопки», что также требовало доработки.

На следующем этапе испытаний доработанный газогенератор имел шесть дутьевых фурм диаметром 8 мм и длиной 18 мм, примерно в три раза увеличенную высоту реакционной зоны (до 320 мм). Кроме того, в зоне газификации (под фурменным поясом) было установлено сужающее устройство в виде усеченного конуса ($d_1 = 200 \text{ мм}$; $d_2 = 405 \text{ мм}$; $h = 205 \text{ мм}$). С целью улучшения сепарации механических примесей из газа и увеличения времени его пребывания в области повышенных температур за счет более равномерного распределения потока по сечению реакционной зоны выход газа из газогенератора осуществлялся под колосниковой решеткой с предварительным сбором его в газосборный коллектор. Для снижения недожога топлива и уменьшения размеров удаляемых через колосниковую решетку продуктов сгорания проведена доработка колосниковой решетки. Она оснащена подвижными в вертикальном и

горизонтальном направлениях элементами с периодическим включением привода их перемещения. В зависимости от количества этих подвижных элементов колосниковая решетка может быть более плотной или более «прозрачной», что дает возможность управлять степенью механического недожога для каждого вида применяемого топлива.

После доработки газогенератора в обращенном процессе газификации из древесных отходов получен газ-сырец в среднем следующего состава (% об.):

$\text{CO} - 20...25\%$; $\text{CO}_2 - 5...10\%$;
 $\text{CH}_4 - 1...2\%$; $\text{H}_2 - 10...15\%$;
 $\text{N}_2 - 50...60\%$; $\text{O}_2 - 0,7...1\%$;
 $Q_n^p = 4800 \pm 1100 \text{ кДж/нм}^3$;
 содержание смол – $10...12 \text{ г/нм}^3$.

Следующая серия экспериментов на газогенераторе ГДО-50 включала отработку технологии газификации различных видов местного топлива и их смесей как при разовой загрузке газогенератора, так и при непрерывном процессе газификации. Для обеспечения непрерывной работы газогенератора узел загрузки топлива выполнен в виде шлюзовой камеры. Кроме того, была уменьшена толщина колосниковой решетки за счет снижения количества подвижных элементов, что позволило увеличить высоту реакционной зоны до 380 мм. Схема усовершенствованного аппарата представлена на рис. 2.

В качестве защитной меры от «хлопков» в аппарате возле шлюзовой камеры дополнительно установлен предохранительный клапан 14 в виде разрывной мембраны, изготовленной из резины толщиной $0,5...0,6 \text{ мм}$. Топливо в газогенератор загружается через шлюзовую камеру 13 до такой степени, чтобы была возможность закрыть поворотную крышку 10. Затем при помощи привода 9 нижняя часть шлюзовой камеры закрывается крышкой 10 для заполнения следующей порцией топлива. Загруженное в газогенератор топливо

поджигается в зоне фурменного пояса, куда затем подается дутьевой воздух, предварительно подогретый в кожухе между наружными и внутренними стенками воздухоподаточного коллектора (направления потоков дутьевого воздуха и выходящего генераторного газа на рис. 2 показаны стрелками). Дутьевой воздух через фурмы 2 поступает в реакционную зону (зону горения), в которой образуются продукты сгорания топлива (угли и газы). Угли поступают через сужающий конус 3 на колосниковую решетку 4, за счет чего образуется кон-

версионная зона. Зола собирается в золосборнике 5. Пропускная способность колосниковой решетки 4 восстанавливается с помощью шуровки золы 6, за счет чего регулируется степень недожога. Образовавшийся в конверсионной зоне генераторный газ поступает в газосборный коллектор 8. С целью предотвращения выброса генераторного газа в атмосферу предусмотрена система сжигания. По мере выработки топлива газогенератор можно подпитывать из шлюзовой камеры, обеспечивая при необходимости непрерывную работу аппарата.

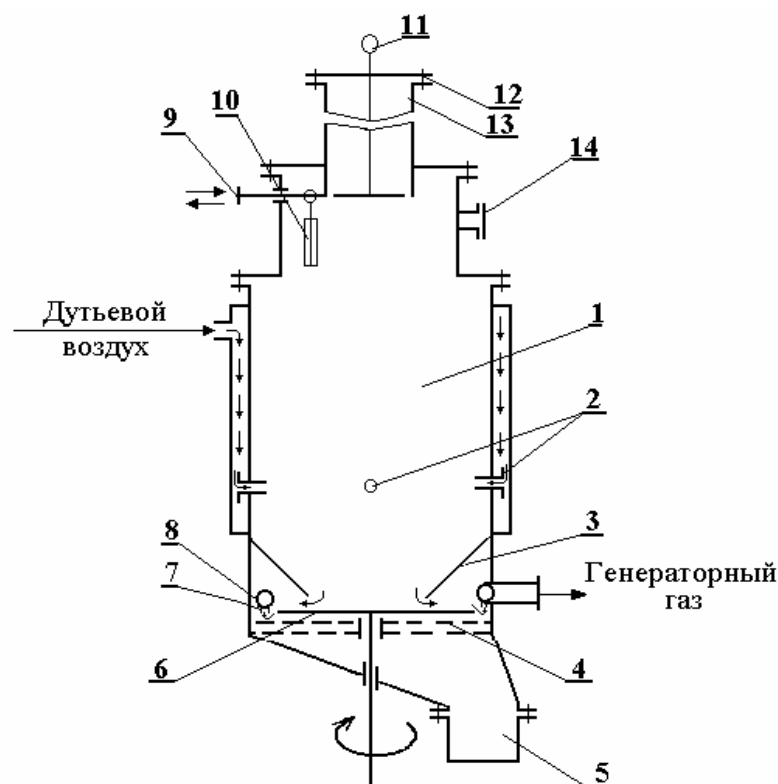


Рис. 2. Принципиальная схема газогенератора ГДО-50: 1 – корпус; 2 – фурменный пояс; 3 – сужающий конус; 4 – колосниковая решетка; 5 – золосборник сухой; 6 – шуровка золы; 7 – отверстия для входа газа; 8 – коллектор для сбора генераторного газа; 9 – привод затвора; 10 – поворотная крышка; 11 – гибкая шуровка; 12 – наружная крышка; 13 – шлюзовая камера; 14 – предохранительный клапан

Для газификации использовались древесные чурки и опилки, торф кусковой, отсев торфа, корневые остатки торфоразработок, измельченная древесина мелколесья и кустарников. Фракционный состав – в пределах 30...60 мм. Отработ-

ка процесса газификации различных видов топлива при разовой загрузке газогенератора проводилась при сравнимых параметрах, при этом величина выхода газа не определялась. Результаты газификации представлены в табл. 1.

Отработка технологии при непрерывном процессе газификации велась при следующих параметрах: избыточное давление в газогенераторе – 5 кПа; расход дутьевого воздуха – до 50 м³/ч; температура в зоне газификации – 900...950 °С. Топливо состояло из древесных чурок размером до 60×30×20 мм различного поперечного сечения, опи-

лок, разноразмерных частей веток и кустарников, а также из смеси древесины с опилками и торфокрошкой. Результаты анализа газа на выходе из газогенератора приведены в табл. 2.

Зависимость изменения горючих компонентов генераторного газа во времени представлена на рис. 3.

Табл. 1. Результаты газификации местных видов топлива и отходов при разовой загрузке газогенератора

Параметр	Тип топлива			
	Древесина мелко- ссы и кустарниковая	Торф кусковой	Корневые остатки торфопереработок	«Отсев» торфа
Влажность топлива, %	9,0	26,0	17,0	21,0
Зольность топлива, %	0,7	2,5	0,25	19,0
Температура процесса, °С	850...950	800...950	850...900	900...950
Давление (изб.), кПа	4	4	4	4
Загрузка топлива, кг	35	40	30	35
Состав газа, % об.:				
H ₂	12,2	10,5	5,8	11,2
CO	26,0	24,2	24,6	12,0
CH ₄	2,3	1,1	0,3	0,5
N ₂	49,6	56,5	62,2	62,7
CO ₂	9,8	6,6	6,2	13,0
O ₂	1,3	3,0	0,95	0,84
Q _{с.г.} ^p , кДж/нм ³	5455,4	5053,1	3900,9	2886,9

Табл. 2. Состав генераторного газа при непрерывном процессе газификации на ГДО-50

Время отбора пробы	Состав сухого газа						Q _{н.} ^p , кДж/нм ³
	H ₂ , % об.	O ₂ , % об.	N ₂ , % об.	CH ₄ , % об.	CO, % об.	CO ₂ , % об.	
11.50	11,8	0,6	52,3	4,0	24,9	8,8	5861,8
12.10	11,7	0,7	58,2	3,4	19,3	8,9	4927,4
12.30	11,6	0,7	53,8	1,6	29,1	4,2	5526,6
13.50	13,2	0,8	52,5	1,6	26,2	6,7	5329,7
14.10	13,6	0,7	53,7	1,9	24,8	6,5	5300,4
14.25	12,0	0,6	49,3	1,4	28,7	8,9	5434,4
14.43	12,2	0,7	52,5	1,5	27,0	7,1	5296,2
15.45	13,8	0,7	51,5	0,7	28,0	5,8	5300,4
16.00	14,0	0,6	53,3	1,5	24,9	6,6	5216,5
16.00	14,0	0,6	53,3	1,5	24,9	6,6	5216,5
16.20	14,2	0,7	49,6	0,6	28,1	7,1	5338,1
16.36	0,8	0,4	69,9	1,3	14,9	6,1	3222,1
17.06	10,5	0,7	57,5	1,2	22,7	8,1	4466,5

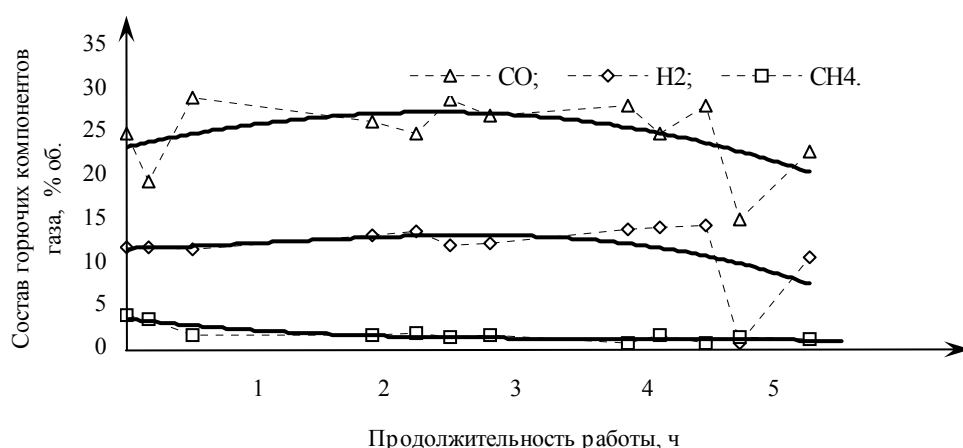


Рис. 3. Характер изменения горючих компонентов генераторного газа во времени при непрерывном процессе газификации на ГДО-50

Из графика видно, что в момент запуска аппарата (начало работы) и после загрузки в аппарат смеси более мелкого вида топлива, когда оно дошло до зоны горения (после 16-го часа работы), заметно резкое отклонение содержания компонентов газа. В остальной промежуток времени содержание горючих компонентов несколько колеблется на уровне средних значений каждого компонента, что свидетельствует об относительно стабильном процессе газификации.

В результате экспериментов замечено, что более «прозрачная» колосниковая решетка является оптимальной с точки зрения гидравлических параметров ведения процесса, однако в этом случае газ на выходе из аппарата имеет повышенную запыленность, особенно при применении сыпучих видов топлива.

При загрузке в аппарат пылеобразного топлива (опилок, порошкового торфа) наблюдалось некоторое снижение температуры процесса, которое можно объяснить снижением порозности зоны горения слишком мелким топливом. Кроме того, увеличивалось сопротивление аппарата и уменьшался расход дутьевого воздуха, поэтому важно подбирать оптимальное соотношение крупных видов топлива с более мелки-

ми видами. Система дозагрузки аппарата топливом показала надежность и работоспособность даже с древесиной предельных размеров для данной конструкции шлюзовой камеры. В этих опытах было достигнуто содержание смол в газе на уровне 0,3...0,5 г/нм³.

Испытания газогенератора ГДО-100

Полученные данные по отработке технологии газификации на газогенераторе ГДО-50 позволили обосновать конструкционную схему ГДО-100 (рис. 4) и других аппаратов тепловой мощностью до 200 кВт.

Техническая характеристика газогенератора ГДО-100:

расход топлива, кг/ч до 100
 влажность топлива, % до 30
 рабочее давление в аппарате (избыточное), кПа до 6
 выход генераторного газа, нм³/ч..... до 200
 расход воздуха на дутье, м³/чдо 180
 масса, кг 630

Газогенератор ГДО-100 состоит из камеры шлюзовой 1 с герметичными затворами; бункера топлива 2; камер газификационной, сбора и отвода генераторного газа 3; колосниковой решетки 4; воздушных (дутьевых) коллекторов 6 с

фурмами (соплами) для подачи воздуха в аппарат; систем контроля. Для обеспечения надежных и безопасных запуска, работы и остановки газогенератор оборудован системой безопасности трех уровней срабатывания в составе предохранительных клапанов и мембран со сбросом избыточного давления в окружающую среду, а также системой пожа-

ротушения. Для безопасных запуска и останова газогенератор снабжен также испарителем воды и системой продувки аппарата азотом (на рис. 4 не показаны). Пары воды (или газообразный азот), подаваемые в аппарат, смещали пределы взрывоопасных концентраций газа и воздуха в безопасную область.

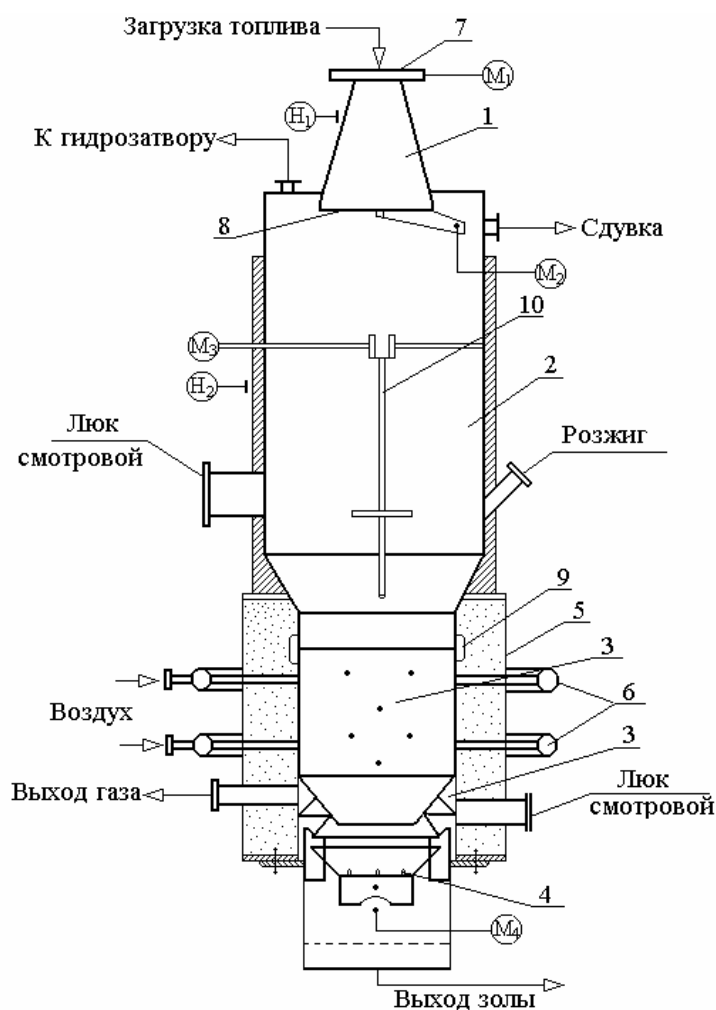


Рис. 4. Схема газогенератора ГДО-100

Камера шлюзовая 1 предназначена для периодической подачи топлива в бункер без останова работы газогенератора, изготовлена в виде усеченного расширяющегося вниз конуса. Объем камеры составляет $\sim 0,11 \text{ м}^3$. Для кон-

троля наличия топлива в камере на высоте 0,3 м от верха установлен датчик уровня. Камера шлюзовая со сторон загрузки и выгрузки топлива отсекается затвором шиберного типа 7 и крышкой 8 со смещенной поворотной осью.

Корпус бункера 2 объемом $\sim 1,85 \text{ м}^3$ изготовлен в виде цилиндра с внутренним диаметром 800 мм, нижняя часть его заужена конусом до внутреннего диаметра 660 мм. На обечайке (в нижней части) смонтированы люк смотровой и патрубок розжига, в верхней части – патрубок для сдувки воздуха при запуске.

В корпусе газогенератора установлен датчик уровня топлива. Периодически, с целью обрушения свода топлива, образующегося перед камерой газификации, приводится в действие устройство ворошения 10 электроприводом М₃ или вручную. Газогенератор снабжен также устройством для ворошения золы с приводом М₄.

Камера 3 для получения генераторного газа, его сбора и вывода из аппарата изготовлена из двух обечаек цилиндрической формы с внутренним диаметром 660 мм. Верхняя часть камеры состоит из обечайки и конуса. Сечение конуса диаметром 660 мм в верхней части переходит на меньший диаметр – для обеспечения уплотненного потока топлива и расчетной теплонапряженности процесса газификации. Объем камеры составляет $\sim 0,23 \text{ м}^3$. В обечайке в два ряда смонтированы 12 фурм, выполненных в виде трубок Вентури. В нижней части камеры установлен конусный узел, состоящий из нескольких конусов и выполняющий функцию коллектора сбора и раздачи генераторного газа. Камера газификации по всей высоте снабжена теплоизоляцией 5 в виде шамотной крошки с наружным экраном.

Колосниковая решетка 4 активного типа состоит из подвижной и неподвижной частей. В состав подвижной части входит шурующее устройство, предназначенное для предотвращения забивки колосниковой решетки золой. Камера, отводящая золу с нижней части решетки, погружена в емкость с водой.

Воздушные (дутьевые) коллекторы 6 предназначены для подвода воздуха в

зону газификации отдельно (или одновременно) через фурмы верхних и нижних рядов.

Газогенератор ГДО-100 испытывался на стенде, представленном на рис. 1. Изучение процесса газификации проводили на древесном топливе из тополя размером чурок $50 \times 50 \times 70$, влажностью 14,4 % и зольностью 0,9 %. Отработка технологических операций пуска-остановки газогенератора, обеспечения надежности и безопасности его работы на частичной нагрузке показали устойчивую работу аппарата и отдельных его узлов. Процесс газификации осуществляли с максимально возможной высотой реакционного слоя углей. После получения устойчивого горения газа в факеле периодически проводили анализ состава генераторного газа. Характер изменения горючих компонентов генераторного газа во времени при непрерывном процессе газификации на ГДО-100 представлен на рис. 5.

Как видно из рис. 5, состав газа в процессе газификации нельзя считать стабильным во времени и оптимальным по составу для данных параметров и указанного вида топлива. Наблюдаются колебание содержания каждого компонента с течением времени и относительно низкое содержание горючих компонентов. Тем не менее полученный газ с теплотворной способностью в пределах $3920 \dots 5388 \text{ кДж/м}^3$ имел устойчивое горение в факеле.

Испытания показали необходимость конструкторской доработки такого аппарата с целью расширения области исследуемых параметров для усовершенствования технологии газификации, а также надколосникового пространства с тем, чтобы устранить или уменьшить вынос золы в генераторный газ. Результаты проведенных исследований и модернизированный газогенератор ГДО-100М были использованы при создании демонстрационного объекта – автономного источника теплоснабжения в

составе газогенераторной установки ГГУ-02 и мини-котельной мощностью 0,2 МВт, функционирование которого

позволит расширить диапазон использования местных видов топлива.

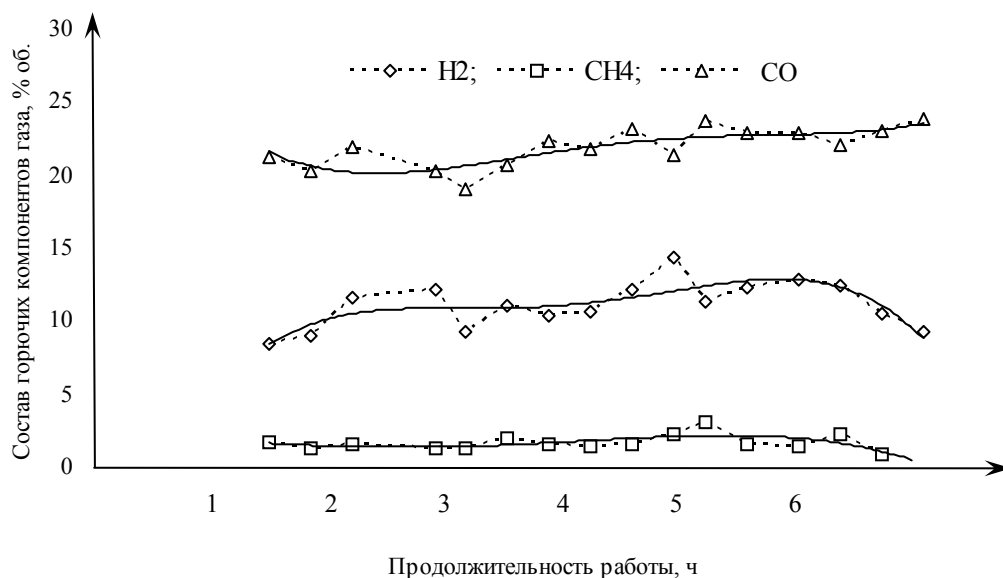


Рис. 5. Характер изменения горючих компонентов генераторного газа во времени при непрерывном процессе газификации на ГДО-100

Заключение

Газогенераторы с обращённым процессом газификации могут быть использованы в основном для специальных целей – получения генераторного газа с низким содержанием смолистых веществ, а также для утилизации биомассы, загрязнённой радионуклидами. При этом требования к топливу, конструкции аппарата, поддержанию параметров процесса более жёсткие, чем для других схем газификации.

В газогенераторах с обращённым процессом газификации можно газифицировать различные виды местного топлива: древесину, кусковой торф и отсев торфа, корневые остатки торфоразработок, измельчённую древесину мелколесья и кустарников, лигнин и древесно-лигнинные смеси.

Достигнуты устойчивые режимы газификации местных видов топлива в газогенераторах с обращённым процессом газификации мощностью 100 и 200 кВт

при температуре до 950 °С.

При обращённом процессе можно получить генераторный газ, близкий по параметрам к силовому, теплотворной способностью 3980...5870 кДж/нм³, который может быть использован для получения тепловой и электрической энергии. Состав и качество этого газа зависят от различных условий, таких как вид отходов, метод дутья, мощность газогенератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гелетуха, Г. Г. Обзор технологий газификации биомассы / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железная // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1998. – № 2. – С. 21–30.
2. Anil, K. Rajvanshi. Biomass gasification / K. Anil // In : Alternative energy in agriculture. Vol. 2, ed. D. Yogi Goswami, CRC press, 1986. – P. 83–102.
3. Гелетуха, Г. Г. Обзор технологий генерирования электроэнергии, полученной из биомассы при её газификации / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железная // Экотехнологии и ресурсосбереже-

ние. – 1998. – № 3. – С. 2–11.

4. **Соловьёв, В. Н.** Анализ влияния параметров циклов преобразования тепла на эффективность производства энергетической продукции из биотоплива на предприятиях деревообрабатывающего комплекса / В. Н. Соловьёв, Н. Д. Гапонёнок // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : тез. докл. 7-й междунар. науч.-техн. конф., Гродно,

27–28 сент. 2007 г. / ГНУ НИЦПР НАНБ; редкол. : А. И. Свиридёнков [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2007. – С. 193–195.

5. **Boerrigter, H.** Review of applications of gases from biomass gasification / H. Boerrigter, R. Rauch // In : Handbook Biomass Gasification, ed. H. A. M. Knoef. Biomass Technology Group (BTG), The Netherlands. – 2005. – P. 33.

ГНУ «Объединённый институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАНБ
Материал поступил 08.07.2009

**V. N. Solovyev, L. A. Bida, N. D. Kuzmina,
G. I. Fokina, A. S. Levchuk, I. G. Pleschankov,
L. I. Hilko**

**The gasification technology elements try-out
of local kinds of fuel**

The gasification technology try-out of local kinds of fuel on large-scale model gas-plant was conducted. The technological process parameters of gasification reverse process by excess pressure, characteristics of fuel and bottom ash, chemical composition of gas phase were studied; safe operating conditions were tryouted, multiple design debugging for the purpose of process optimization was conducted. The conducted research cycle allowed to construct pilot models of gas-plants of type GWW with capacity 100 and 200 kilowatt, and also experimental independent power-supplier composed of gas-plant and mini-boiler plant on producer gas with capacity 0,2 megawatt.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 681.324:354 (478) + 504.062

**И. В. Войтов, д-р техн. наук, проф., М. А. Гатих, д-р техн. наук, проф.,
Г. П. Писарик, канд. техн. наук, В. А. Рыбак, канд. техн. наук**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ВЗАИМОСВЯЗИ В ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

В статье описаны основные принципы построения и использования электронной системы мониторинга Государственной программы инновационного развития (ЭСМ ГПИР). Показано, что ЭСМ ГПИР обеспечивает автоматизацию комплекса задач мониторинга инновационных проектов на основе новых информационных технологий и является составной частью современных систем управления экономикой, представляя для них качественно новую информацию и обеспечивая новый уровень управленческих решений. Подробно описаны функции информационного ядра ЭСМ ГПИР, цели, задачи, структурные компоненты, параметры и показатели инновационных проектов, являющиеся основными объектами автоматизации, методами и средствами электронного мониторинга, приведена схема взаимодействия системы с пользователями.

В настоящее время в Республике Беларусь стимулируется инновационная деятельность, реализуется План инновационного развития страны на 2007–2010 гг. [1]. Известно [2], что инновационная деятельность – это вид деятельности, связанный с трансформацией идей в технологически новые или усовершенствованные продукты или услуги, внедрённые на рынке, в новые или усовершенствованные технологические процессы или способы производства (передачи) услуг, использованные в практической деятельности.

Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь (ГПИР) направлена на достижение главного приоритета страны – перевода национальной экономики в режим интенсивного развития в рамках белорусской экономической модели и определяет цели и задачи инновационного развития экономики, направления, механизмы и средства их реализации. В основу государственной программы заложено поэтапное построение национальной инновационной системы (НИС) –

современной институциональной модели генерации, распространения и использования знаний, их воплощения в новых продуктах, технологиях, услугах во всех сферах жизни белорусского общества [3, 5].

Важным направлением в области государственной научно-технической политики является формирование и реализация ГПИР, которую следует рассматривать как систему мер, направленную на регулирование и развитие процессов создания, освоения и использования инноваций как стратегического фактора развития экономики [5]. В связи с этим придается большое значение построению электронной системы мониторинга ГПИР (ЭСМ ГПИР), основанной на современных научно-технических принципах в области инновационных информационных технологий и имеющей существенный государственный приоритет.

ЭСМ ГПИР обеспечивает автоматизацию решения комплекса задач мониторинга инновационных проектов на основе новых информационных техно-

логий. Мониторинг инновационных проектов является составной частью современных систем управления экономикой, предоставляя для них качественно новую информацию и обеспечивая новое качество управленческих решений.

Применение электронной системы мониторинга инновационных проектов позволяет организовать систематическое, научно обоснованное отслеживание выполнения запланированных мероприятий по каждому проекту, систематизировать информацию в разрезе отраслей, регионов, отслеживать выполнение финансовых показателей и принимать взвешенные решения на основе своевременной реальной информации и фактов, создающие наилучшие условия для решения текущих экономических проблем.

Информационным ядром ЭСМ ГПИР являются:

- унифицированная система входных документов на основе электронных форм, используемых для описания инновационных проектов;

- единый формат представления предприятиями инновационных проектов и отчетности в электронном виде;

- единая база данных субъектов экономики с информацией об инновационных проектах.

ЭСМ ГПИР предоставляет возможность:

- формировать базы данных по инновационным проектам и инновационному развитию субъектов экономики с информацией о финансово-экономических показателях и выполнению ими установленных заданий;

- группировать инновационные проекты по организациям, отраслям, регионам, систематизировать их в масштабах республики;

- контролировать выполнение установленных заданий и показателей инновационного развития с указанием причин невыполнения показателей;

- фиксировать электронный доку-

ментооборот по каждому проекту;

- проводить оперативный анализ выполнения показателей инновационного развития на основе методологии «план-факт»;

- осуществлять ранжирование проектов с целью принятия управленческих решений по каждой из групп;

- группировать проекты по ведомственным и территориальным признакам, по признакам предприятий;

- выдавать рекомендации, обеспечивающие принятие взвешенных управленческих решений на основе своевременной реальной информации и фактов;

- представлять информацию в виде электронных форм и их наборов по отраслевым и региональным органам управления.

Система позволяет осуществлять:

- регистрацию субъектов экономики (предприятий) с указанием идентификационных характеристик (реквизитов);

- регистрацию всех документов, участвующих в электронном обмене по каждому предприятию и фиксацию действий, проводимых с этими документами;

- хранение исходных файлов электронных документов произвольных форматов, которые регистрируются в системе, с возможностью их последующего просмотра в том приложении, в котором они созданы;

- экспорт/импорт данных в формат XML для обмена сведениями между приложениями и платформами (операционными системами);

- представление данных о планах развития и инвестиционных проектах в формате, удобном для последующей обработки.

Основными составляющими ЭСМ ГПИР являются:

- программно-технический комплекс подготовки, заполнения, проверки и представления электронных XML-форм инновационных проектов;

- программно-технический комплекс для автоматизации сбора элек-

тронных форм, обеспечения накопления информации, ее хранения, обработки и предоставления для анализа руководству соответствующего уровня;

- комплекс распределенных баз данных инновационных проектов, объединенных в целостную систему;

- комплекс распределенных баз данных планирования и анализа, объединенных в целостную систему;

- средства информационного взаимодействия организаций, органов государственного и регионального управления;

- программно-технический комплекс разработки и предоставления электронных форм исполнителям проектов.

В организационном плане ЭСМ ГПИР охватывает четыре уровня:

- 1) организации-исполнители инновационных проектов;

- 2) государственные заказчики инновационных проектов;

- 3) государственный комитет по науке и технологиям, включая ГУ БелИСА – ответственный за реализацию ГПИР;

- 4) Совет Министров Республики Беларусь.

На первом организационном уровне используется программно-технический комплекс подготовки, заполнения, проверки и представления электронных XML-форм инновационных проектов. Он реализован на основе программного комплекса Microsoft Office InfoPath 2003 и обеспечивает работу с электронными формами, включает необходимые справочники ОКПО, УНН и др. Организации устанавливают компоненты ПО на своих рабочих станциях и активизируют их, обеспечивая тем самым готовность к приему шаблонов электронных форм и их заполнению.

Шаблоны электронных форм инновационных проектов проектируются специальными средствами, утверждаются Государственным комитетом по науке и технологиям и рассылаются по электронной почте всем организациям и

одновременно публикуются на сайте ГКНТ вместе с инструкциями по их заполнению.

Контроль данных осуществляется в два этапа – первичный контроль и вторичный. Первичный контроль осуществляется на этапе ввода данных, непосредственно при заполнении электронных форм в организациях путем проверки их на соответствие формальным правилам, изложенным в инструкциях.

Вторичный контроль осуществляется на этапе консолидации данных, непосредственно перед занесением их в базу данных инновационных проектов путем сравнения вводимых данных с предыдущими данными.

Профильтрованные по этим признакам электронные формы поступают на вторичный контроль на соответствие числовых данных определенным критериям, после проверки их заносят в базу данных на постоянное хранение.

Такое построение системы обеспечивает разделение проверенных и непроверенных данных в отдельных базах данных, что ускоряет их анализ и обработку.

На втором–четвертом уровнях используется программно-технический комплекс для автоматизации сбора электронных форм, обеспечения накопления информации, ее хранения, обработки и предоставления для анализа руководству. Он реализуется на основе серверных компонентов IBM Lotus Domino/Notes и DB2. Это решение хорошо зарекомендовало себя при организации сложных систем баз данных, а также при организации бизнес-процессов с использованием XML-документов. В качестве клиентского программного обеспечения используется IBM Lotus Notes 8.0 и Microsoft Internet Explorer 6.0. Internet Explorer обеспечивает взаимодействие с порталом и Web-компонентами, а IBM Lotus Notes 8.0 – защищенное взаимодействие с базами данных.

Информация ЭСМ ГПИР интегрируется в базах данных, содержащих данные и документы соответственно

реляционно- и документоориентированных типов DB2 и IBM Lotus Domino/Notes.

База данных IBM Lotus Domino является неструктурированной и представляет собой массивы документов, каждый из которых содержит элементы (items), называемые единицами информации. База данных идентифицируется именем файла и ID (идентификатор) и хранит все данные, программные элементы и элементы проекта в одном NSF (Notes Storage File) файле. Вместо записей в базе данных используются заметки (notes), в которых можно хранить разные типы данных, например формы, созданные в базе данных (хранятся как заметки, каждое представление хранится как заметка).

Для ввода данных используются формы. Каждая форма может содержать несколько элементов, включая статический текст, таблицы, графики, действия.

Следует отметить, что при создании электронных форм используется Microsoft Office InfoPath 2003, в котором поддерживаются следующие основные компоненты:

- XSD-схема данных;
- XSL-преобразование;
- Manifest.xsn – служебный файл, в котором хранятся настройки формы;
- Script.js – пользовательские сценарии.

Заполненная электронная форма представляет собой документ XML, в котором содержится ссылка на шаблон формы, а также инструкция по обработке. Созданная форма посылается по электронной почте пользователя, проходит предварительную обработку и контроль и поступает на обработку в специальный модуль, который обеспечивает извлечение данных из формы и рассылку их в соответствующие поля базы данных. База данных обеспечивает хранение множества электронных форм инновационных проектов как источников первичной информации. Для обеспечения первичного анализа информа-

ции в среде IBM Lotus Domino/Notes и DB2 с помощью специальных языков программируются представления в виде динамических таблиц, отражающих аналитическую информацию по:

- контролю поступления отчетных форм от организаций, реализующих инновационные проекты, в разрезе органов отраслевого и регионального управления;

- контролю планируемых и фактических инвестиционных затрат по каждому инновационному проекту в разрезе органов отраслевого и регионального управления и по каждой организации;

- контролю ввода в эксплуатацию объектов, создаваемых в результате реализации инновационных проектов с поквартальными разрезами;

- контролю выполнения заданий по каждому инновационному проекту, в том числе с поквартальной разбивкой;

- контролю объема производства инновационной продукции в разрезе органов отраслевого и регионального управления;

- контролю создания рабочих мест в результате реализации инновационных проектов в разрезе органов отраслевого и регионального управления;

- контролю количества приобретенных новых технологий, в том числе за рубежом и в странах СНГ;

- контролю количества патентов.

Они отражают данные о состоянии инновационных проектов, в том числе по:

- органам отраслевого и регионального управления;

- предприятиям – исполнителям проектов;

- уровням проекта;

- территориальным признакам;

- численности производственного персонала;

- выполнению заданий и этапов прохождения проектов;

- использованию инвестиций;

- вводу в эксплуатацию новых объектов;

- выведению объектов на проектную мощность;
- составу инновационной продукции;
- использованию новых технологий;
- патентам;
- создаваемым рабочим местам;
- планированию прохождения этапов проектов;
- планированию объемов затрат.

Информационное взаимодействие с пользователями ЭСМ ГПИР осуществляется в режиме off-line и on-line с использованием компонентов защиты на основе брандмауэров и реализации двух демилитаризованных зон (рис. 1).

Компоненты защиты обеспечивают работу пользователей через сеть Internet с применением виртуальных частных каналов и средств шифрования информации при ее передаче по данным каналам. В режиме off-line пользователям предоставляется клиентское программное обеспечение, которое содержит необходимые электронные формы. Пользователь вносит данные, сохраняет информацию в виде стандартного файла XML и посылает по электронной почте для последующего автоматизированного занесения в базу ЭСМ ГПИР. Средства автоматизации включают предбазовую обработку информации, ее проверку и занесение в регламентные формы, синхронизированные как в системе IBM Lotus Domino, так и в DB2. Система также выполняет функции по регистрации и просмотру документов, в том числе по организации и региону.

В режиме on-line пользователь получает доступ по протоколу HTTP к ресурсам Web-сервера, заполняет XML-формы в интерактивном режиме, которые в последующем заносятся автоматизированным способом в базу данных ЭСМ ГПИР.

Режим off-line ориентирован на работу с пользователями, не имеющими достаточных ресурсов для работы в сети Internet в интерактивном режиме. В этом случае подготовка электронных

форм осуществляется на автономном компьютере, электронная форма оформляется в соответствии с принятой технологией подготовки и отсылается по электронной почте в базу почтовых сообщений. Администратор базы данных просматривает поступившее сообщение, корректирует при необходимости информацию и передает ее для занесения в центральную базу данных.

В системе предусмотрена работа также в неавтоматизированном режиме. В этом случае пользователи заполняют электронную форму в любом из форматов и передают ее администратору базы данных для занесения информации вручную.

При взаимодействии с зарегистрированными пользователями система обеспечивает проверку идентификационных данных и на основании этого определяет режим доступа к информационным ресурсам.

Выводы

Использование ЭСМ ГПИР позволяет:

- организовать оперативный электронный обмен информацией между всеми участниками инновационной деятельности на основе единых стандартов;
- сократить сроки предоставления информации о ходе выполнения инновационных проектов;
- повысить оперативность контроля за выполнением показателей инновационных проектов по каждой организации, в разрезе министерств и ведомств, регионов, с использованием статистической отчетности;
- повысить качество и оперативность подготовки сводной информации и аналитических выводов, способствующих своевременному принятию соответствующих управленческих решений, позволяющих улучшить ход выполнения проектов.

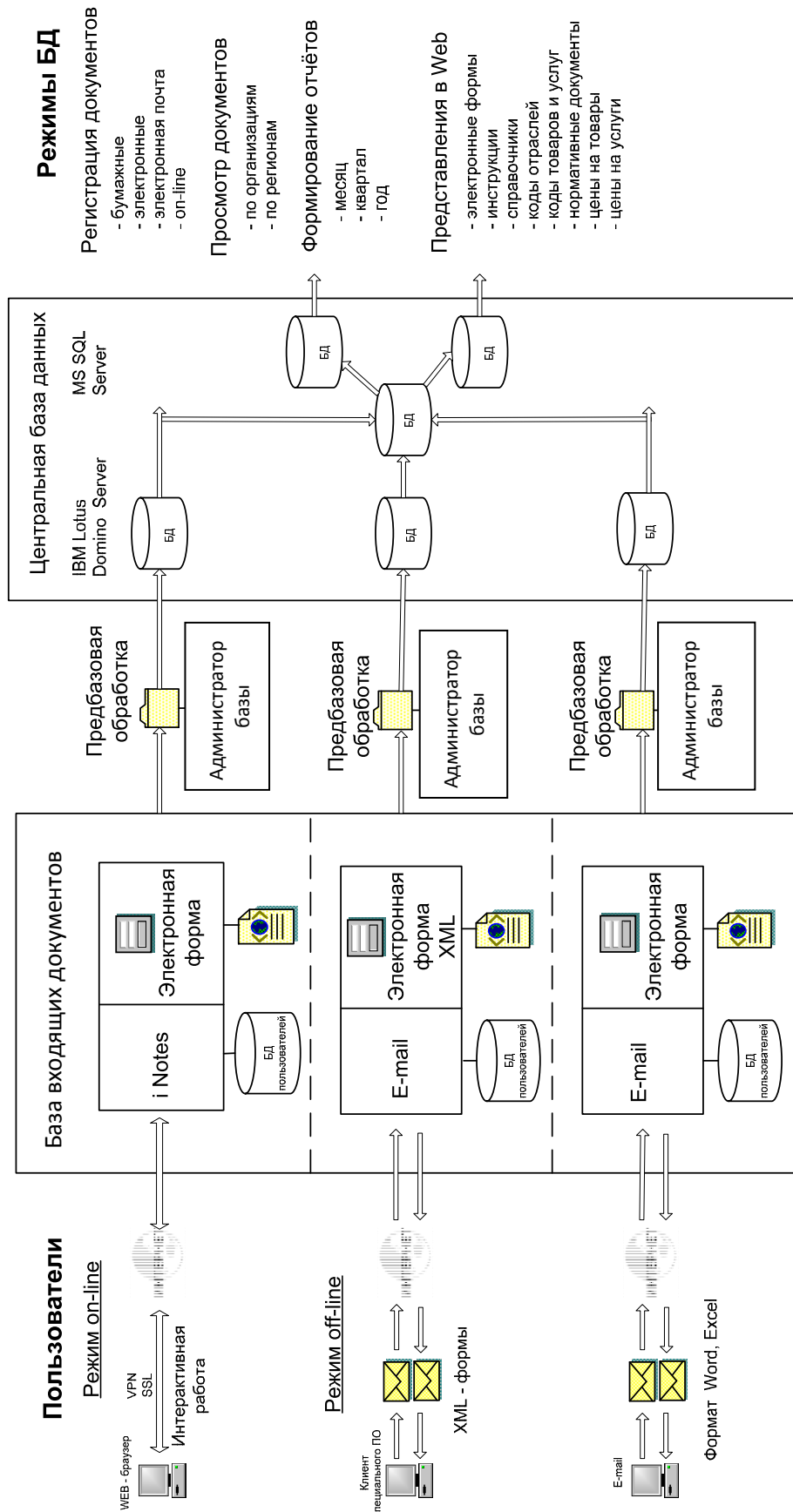


Рис. 1. Схема взаимодействия с пользователями

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. План реализации Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2007–2010 гг. – Минск : ГУ БелИСА, 2007. – 400 с.
2. Наука, инновации и технологии в Республике Беларусь 2005. Статистический сборник / Под ред. В. П. Томашевич [и др.]. – Минск : ГУ БелИСА, 2006. – 204 с.
3. **Войтов, И. В.** Стратегия устойчивого развития Республики Беларусь и Государственная программа инновационного развития на 2007–2010 гг. Республика Беларусь : инновационная экономика – конкурентоспособность – безопасность / И. В. Войтов // Сб. докл. XIV

Белорусского конгресса по телекоммуникациям, информационным и банковским технологиям «ТИБО-2007». – Минск : ГУ БелИСА, 2007. – 236 с.

4. **Карпенко, Е. М.** Оценка инновационной восприимчивости промышленных предприятий : сб. науч. тр. / Е. М. Карпенко, С. Ю. Комков ; под ред. В. Н. Недилько. – Минск : ГУ БелИСА, 2004. – 164 с.

5. **Недилько, В. Н.** О механизме государственной поддержки науки и инноваций : сб. науч. тр. / В. Н. Недилько, А. Н. Коршунов, И. В. Хартонин ; под ред. В. Н. Недилько. – Минск : ГУ БелИСА, 2004. – 164 с.

Государственный комитет по науке и технологиям
Научно-исследовательский экономический институт
Академия управления при Президенте Республики Беларусь
Материал поступил 18.05.2009

I. V. Voitov, M. A. Gatih, G. P. Pisarik, V. A. Rybak
Scientific-technical principles of creating and intercommunication in the electronic system of monitoring of state program of innovations development of Belarus

The results of the creating and intercommunication in the electronic system of monitoring of state program of innovations development of Belarus are presented. The functions of the informational core, goals, tasks, structural components, parameters and indexes of innovation projects are described; the diagram of interaction with users is stated.

УДК 621.311

А. С. Фиков

ПОТЕНЦИАЛ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ОТ ОЧИСТКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

Предложен метод определения потенциала энергосбережения от очистки магистральных нефтепроводов. Метод основывается на построении линейных трендов эквивалентного диаметра нефтепровода. Влияние эквивалентного диаметра нефтепровода на энергопотребление учитывается посредством коэффициента эластичности расхода электрической энергии по эквивалентному диаметру нефтепровода.

На поверхностях технологического оборудования добычи и транспортировки нефти в процессе эксплуатации образуются парафиновые отложения. Изучению механизма отложения парафина посвящено много отечественных и зарубежных работ. Этот механизм характеризуется двумя процессами: выпадением парафина из нефти и осаждением выпавшего парафина на внутренних поверхностях трубопроводов [1]. Значительный интерес к данной предметной области обусловлен необходимостью защиты от отложений парафина, снижающих технологические характеристики оборудования. Удаление накопленных парафиновых отложений производится различными способами и зависит от конструктивной особенности оборудования. Так, например, обвязку нефтеперекачивающих станций предлагается очищать перегретым паром [2]. Удаление осадков резервуарного парка осуществляется с использованием химических и механических средств. Очистка магистральных нефтепроводов производится механически с помощью скребков [3].

Вопрос очистки магистральных нефтепроводов обычно рассматривается с точки зрения поддержания пропускной способности, однако в условиях роста цен на энергоносители важной составляющей экономического эффекта является экономия энергоресурсов. Уменьшение эквивалентного диаметра нефтепровода за счет отложений парафина снижает пропускную способность

нефтепровода и при неизменных других технологических факторах приводит к увеличению удельного расхода электрической энергии (ЭЭ) на транспортировку нефти.

Количество пропусков очистных устройств при периодической очистке определяется для каждого нефтепровода особенностью эксплуатации, свойствами перекачиваемой нефти, а также экономической целесообразностью. Увеличение пропускной способности магистрального нефтепровода χ , %, оценивается по эмпирическому выражению в зависимости от количества пропусков очистных устройств [3]:

$$\chi = a \cdot K \left[1 + \frac{b}{2}(1 - K) \right] 100, \quad (1)$$

где a , b – эмпирические множители, определяемые для каждого нефтепровода в отдельности; K – количество пропусков очистных устройств.

Такой подход к планированию очистки показывает недостаточную изученность влияния режима пропуска очистных устройств на технологические параметры транспортировки нефти.

Согласно [3, 4] периодическая очистка нефтепровода проводится при снижении пропускной способности нефтепровода более чем на 3 % или уменьшении эквивалентного диаметра нефтепровода d_e в одном направлении более чем на 2,5 %. Поскольку мгновенное значение мощности, потребляемой насосными агрегатами, пропорцио-

нально эквивалентному диаметру нефтепровода в степени минус 4,75 [5], то перерасход ЭЭ за счет отложений парафина перед пропуском очистных устройств может достигать 12 %. В этих условиях задачи прогноза изменения электропотребления от пропуска очистных устройств с целью поддержания проектной пропускной способности нефтепровода, определения потенциала энергосбережения от очистки магистральных нефтепроводов являются весьма актуальными.

Один из существующих способов определения изменения электропотребления от периодической очистки нефтепровода основан на сравнении расчетных значений удельного расхода ЭЭ до очистки и после нее, при этом сэкономленная ЭЭ оценивается по выражению [6]

$$\Delta W = \frac{(h_1 - h_2) \cdot P}{A \cdot L \cdot \eta}, \quad (2)$$

где h_1, h_2 – полные потери напора до и после очистки нефтепровода соответственно, м; P – грузооборот нефти за расчетный период, тыс. т·км; A – коэффициент, $A = 0,3672 \cdot 10^{-3}$ тыс. т·км/(кВт·ч); L – протяженность участка нефтепровода, м; η – КПД нефтепровода.

На практике потери напора постоянно изменяются не только в результате очистки нефтепровода, но и под воздействием таких факторов, как смена состава насосных агрегатов, смена ротора или обрезка рабочего колеса насосного агрегата, изменение вязкости нефти, включение или отключение лупинга, открытие перемычки между двумя нитками нефтепровода, срабатывание системы автоматического регулирования и т. д. Так, например, в условиях постоянно изменяющейся производственной программы увеличение грузооборота нефти за счет включения дополнительного насосного агрегата вызывает увеличение потерь напора по длине нефтепровода, и возможна ситуация, когда $h_2 > h_1$. При этом формально очистка

нефтепровода вызовет не снижение, а увеличение электропотребления.

Изложенный в [7] способ оценки изменения расхода ЭЭ от периодической очистки нефтепровода с целью поддержания проектной пропускной способности основан на использовании выражений (3), (4) и проиллюстрирован на рис. 1:

$$\Pi'_d = e'_d \left(1 - \frac{d'_{32}}{d'_{3, баз}} \right) \cdot 100; \quad (3)$$

$$\Pi''_d = e''_d \left(1 - \frac{d''_{32}}{d''_{3, баз}} \right) \cdot 100, \quad (4)$$

где e'_d – коэффициент эластичности расхода ЭЭ по эквивалентному диаметру нефтепровода в середине интервала очистки нефтепровода; e''_d – коэффициент эластичности расхода ЭЭ по эквивалентному диаметру нефтепровода в середине интервала между очистками нефтепровода; d'_{32} – измененное значение эквивалентного диаметра нефтепровода в результате очистки в середине интервала очистки нефтепровода, м; d''_{32} – измененное значение эквивалентного диаметра нефтепровода в результате очистки в середине интервала между очистками нефтепровода, м; $d'_{3, баз}$ – базисное значение эквивалентного диаметра нефтепровода (без очистки) в середине интервала очистки нефтепровода, м; $d''_{3, баз}$ – базисное значение эквивалентного диаметра нефтепровода (без очистки) в середине интервала между очистками нефтепровода, м.

Коэффициент эластичности показывает, на сколько процентов изменится электропотребление при изменении эквивалентного диаметра на 1 %.

Изменение эквивалентного диаметра нефтепровода оценивается относительно предположительного линейного тренда. Данный тренд параметра d_3 определяется исходя из предположения о том, что эквивалентный диаметр неф-

теппровода без проведения очистки «за-
растал» бы отложениями парафина с
той же интенсивностью, что и после
очистки. Выбор за базис предположи-
тельного линейного тренда 3 позволяет
оценить сэкономленную электрическую
энергию путем очистки нефтепровода,
но не позволяет производить сравнение
эффективности различных способов
очистки, оценивать резервы экономии

энергии за счет рационализации спосо-
бов очистки. Действительно, улучшение
качества очистки, например увеличи-
ем числа пропусков очистных уст-
ройств, должно приводить к уменьше-
нию соотношения $d''_{32}/d''_{3,баз}$, а значит, и
к уменьшению оценки экономии энер-
гии за счет очистки нефтепровода.

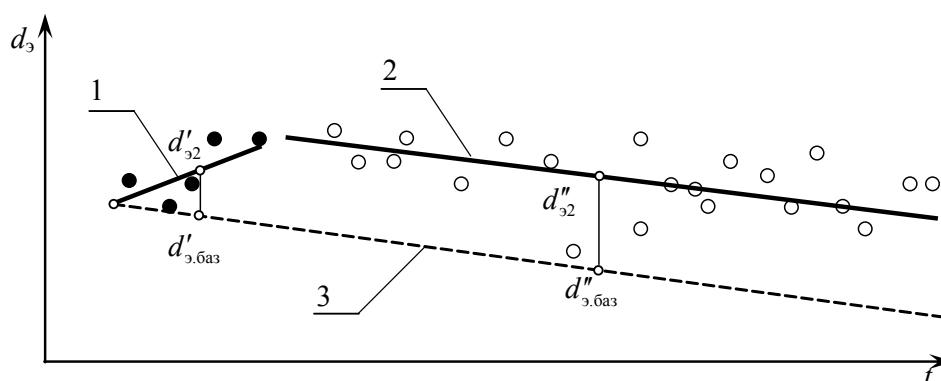


Рис. 1. Динамика эквивалентного диаметра нефтепровода во время и после очистки нефтепровода: ● – эквивалентный диаметр во время очистки нефтепровода; ○ – эквивалентный диаметр после очистки нефтепровода; 1 – линейный тренд эквивалентного диаметра во время очистки нефтепровода; 2 – линейный тренд эквивалентного диаметра после очистки нефтепровода; 3 – предположительный линейный тренд эквивалентного диаметра без очистки нефтепровода

Для определения потенциала энер-
госбережения от очистки парафинистых
отложений нефтепровода предлагается
выражение, применимое как для линей-
ного, так и для нелинейного изменения
во времени эквивалентного диаметра
нефтепровода:

$$\Delta W = \sum_{i=1, N} e_{di} W_i \left[\Delta n_i - \Delta n_i^2 \cdot d_{э, \max} / \int_{n_i}^{n_{i+1}} d_{эi}(n) dn \right], \quad (5)$$

где N – количество трендов эквивалент-
ного диаметра нефтепровода; e_d – коэф-
фициент эластичности эквивалентного
диаметра нефтепровода; W – среднесу-
точное электропотребление, кВт·ч/сут;
 Δn – продолжительность интервала вре-
мени увеличения или уменьшения экви-
валентного диаметра нефтепровода, сут;
 $d_{э, \max}$ – максимальное значение эквива-
лентного диаметра нефтепровода, м; n –
время, сут; $d_{э}(n)$ – функция, описы-
-

щая изменение эквивалентного диамет-
ра во времени, м.

Продолжительность интервала вре-
мени Δn_i , сут, увеличения или уменьше-
ния эквивалентного диаметра нефтепро-
вода определяется из выражения

$$\Delta n_i = n_{i+1} - n_i. \quad (6)$$

Начальное n_1 и конечное n_{N+1} зна-
чения времени, в интервале которых
определены зависимости эквивалентно-
го диаметра нефтепровода $d_{эi}(n)$, явля-
ются исходной информацией к расчету.
Значения времени n_i , соответствующие
смене тенденции эквивалентного диа-
метра нефтепровода, определяются пу-
тем решения следующего уравнения от-
носительно n :

$$d_{эi-1}(n) - d_{эi}(n) = 0. \quad (7)$$

В выражении (5) изменение эквивалентного диаметра нефтепровода в процессе очистки нефтепровода и после нее оценивается относительно значения эквивалентного диаметра нефтепровода $d_{э, \max}$, превышение которого за счет очистки парафинистых отложений принимается невозможным. Значение параметра $d_{э, \max}$, м, определяется как максимальное из числа значений эквивалентного диаметра нефтепровода, описываемого функциями $d_{эi}(n)$:

$$d_{э, \max} = \max\{d_{э1}(n_1), d_{э2}(n_2), \dots, d_{эN}(n_N), d_{эN}(n_{N+1})\}. \quad (8)$$

На рис. 2 условно показаны зависимости эквивалентного диаметра нефтепровода в различные интервалы времени. Получение данных зависимостей основывается на статистической информации поведения параметра $d_{э}$ на временных интервалах очистки нефтепровода (возрастающие зависимости) и между очистками (убывающие зависимости).

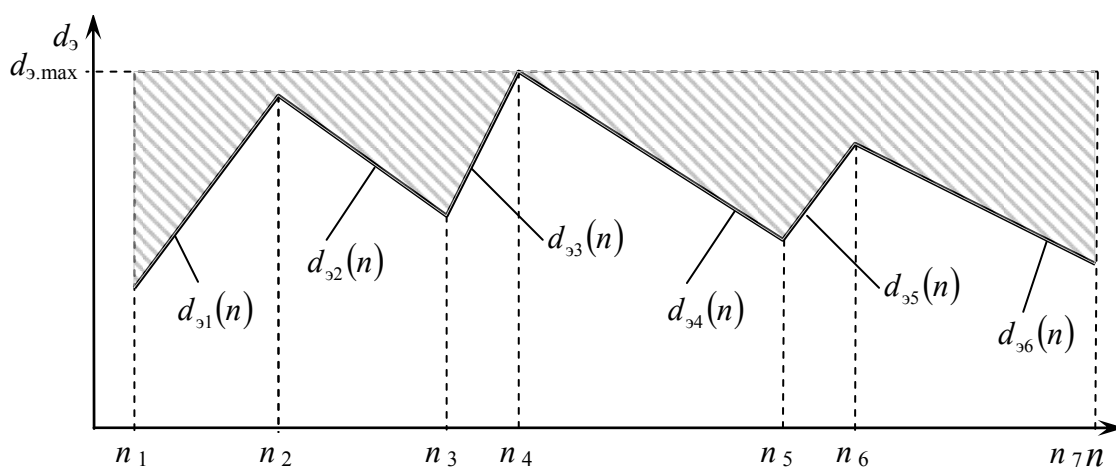


Рис. 2. Изменение эквивалентного диаметра нефтепровода в процессе его очистки

Наиболее удобным методом получения зависимостей $d_{э}(n)$ является метод наименьших квадратов. Рис. 2 поясняет принцип определения параметров предложенного выражения (5) для определения потенциала энергосбережения от очистки парафинистых отложений нефтепровода. Заштрихованная область характеризует потенциал энергосбережения за счет совершенствования способов очистки.

Исследованную динамику эквивалентного диаметра нефтепровода $d_{э}(n)$, м, возможно описать линейными зависимостями вида

$$d_{э}(n) = a \cdot n + b, \quad (9)$$

где a — коэффициент регрессии, опреде-

ляющий скорость изменения эквивалентного диаметра нефтепровода в процессе очистки и после нее, м/сут; n — время, сут; b — свободный член уравнения регрессии, м.

В случае принятия линейного вида зависимости эквивалентного диаметра нефтепровода от параметра n выражение (5) для определения потенциала энергосбережения от очистки нефтепровода запишется в виде

$$\Delta W = \sum_{i=1, N} e_{di} W_i \Delta n_i \frac{1 - d_{\max}}{a_i \left[n_i + \frac{\Delta n_i}{2} \right] + b_i}. \quad (10)$$

Значения времени смены тенденции эквивалентного диаметра нефтепровода определяются путем решения

уравнения (7) относительно n и при $i \in [2; N]$ находятся по выражению

$$n_i = -\frac{b_i - b_{i-1}}{a_i - a_{i-1}}, \quad (11)$$

где b_i , b_{i-1} – свободные члены линейных уравнений регрессии, аппроксимирующих значения эквивалентного диаметра нефтепровода на интервалах времени Δn_i и Δn_{i-1} , м; a_i , a_{i-1} – коэффициенты линейных уравнений регрессии, аппроксимирующих значения эквивалентного диаметра нефтепровода на интервалах времени Δn_i и Δn_{i-1} , м/сут.

Максимальное значение эквивалентного диаметра нефтепровода, $d_{\max}$, м, достигнутое в результате его очистки, определяется на границах смены направлений линейных трендов эквивалентного диаметра нефтепровода:

$$d_{\max} = \max\{a_1 \cdot n_1 + b_1, a_2 \cdot n_2 + b_2, \dots, a_N \cdot n_N + b_N, a_{N+1} \cdot n_{N+1} + b_{N+1}\}. \quad (12)$$

На рис. 3 и 4 представлена динамика эквивалентного диаметра нефтепровода в процессе его очистки. Численные значения эквивалентного диа-

метра нефтепровода имеют разброс относительно аппроксимирующих линейных трендов, что вызвано случайной составляющей погрешности определения данного параметра. Наличие наблюдаемой погрешности не позволяет использовать для целей определения потенциала энергосбережения от пропуска очистных устройств единичные значения параметра d , в начале и конце интервалов очистки нефтепровода, определенные путем косвенных измерений. В частности, на интервале, соответствующем времени между вторым и третьим пропуском очистных устройств (см. рис. 3), начальное и конечное значения эквивалентного диаметра нефтепровода равны 1,056 м. Согласно оценке единичных значений параметра d , эквивалентный диаметр в рассматриваемом интервале времени не изменился. Анализ линейного тренда на рассматриваемом интервале времени показывает, что эквивалентный диаметр нефтепровода уменьшился на 0,5 %. Этому значению соответствует средний перерасход ЭЭ 0,7 %.

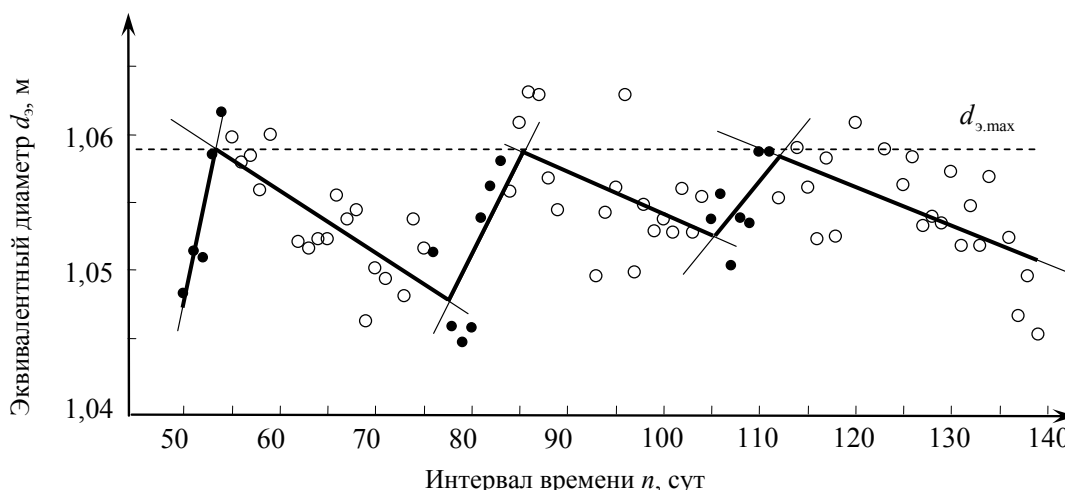


Рис. 3. Динамика эквивалентного диаметра нефтепровода в процессе его очистки (1-й режим очистки)

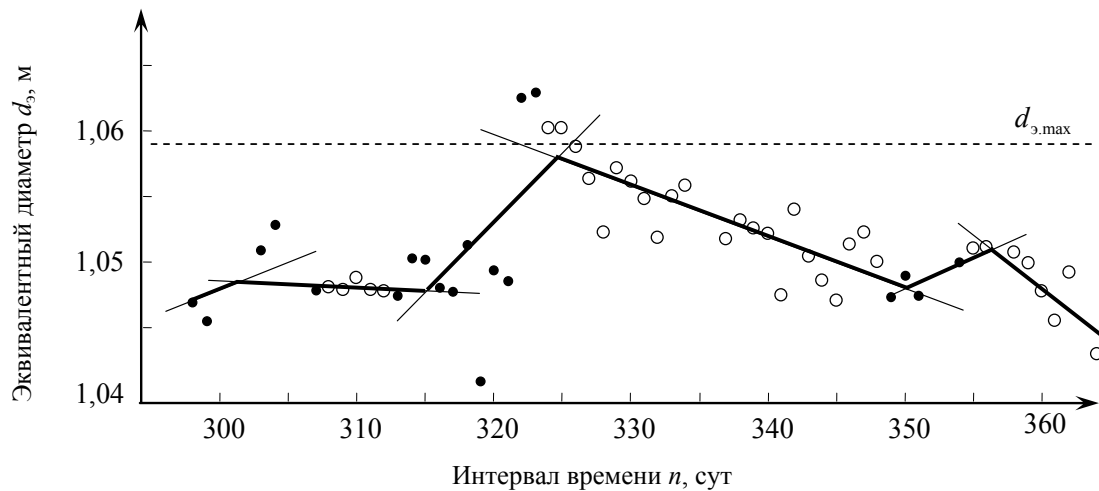


Рис. 4. Динамика эквивалентного диаметра нефтепровода в процессе его очистки (2-й режим очистки)

В соответствии с предложенным выражением (10) определяется потенциал энергосбережения (см. рис. 3 и 4). Максимальное достигнутое значение эквивалентного диаметра нефтепровода в первом режиме очистки составило $d_{э, \max} = 1,059$ м. Это же значение принято в качестве максимального для второго режима очистки, поскольку рассматриваемые режимы очистки относятся к одному участку нефтепровода.

Расчет потенциала энергосбережения, определяемого исходя из соображения поддержания данного значения

эквивалентного диаметра нефтепровода во всем интервале времени его эксплуатации, представлен в табл. 1 и 2.

Значения резерва энергосбережения в первом и втором режимах очистки нефтепровода получены за временные периоды различной продолжительности (для первого режима $n_{\text{сум}} = 89$ сут, второго режима $n_{\text{сум}} = 66$ сут). Для удобства сравнения величины ΔW их необходимо привести к единому временному периоду $n_{\text{пр}}$, в качестве которого могут выступать сутки, месяц, квартал или год.

Табл. 1. Расчет потенциала энергосбережения от очистки нефтепровода в первом режиме

Номер тренда	Зависимость $d_э(n)$, м	Начало интервала n , сут	Продолжительность интервала Δn , сут	Коэффициент эластичности e_d	Среднесуточное электропотребление W , тыс. кВт·ч/сут	Резерв энергосбережения ΔW , кВт·ч
1	$33,81 \cdot 10^{-4} n + 0,878$	50	3,6	-1,40	931	26 127
2	$-4,62 \cdot 10^{-4} n + 1,084$	53,6	24,5	-1,40	931	163 906
3	$14,21 \cdot 10^{-4} n + 0,937$	78,1	7,2	-1,40	930	53 014
4	$-3,14 \cdot 10^{-4} n + 1,085$	85,3	19,4	-1,50	850	90 027
5	$8,70 \cdot 10^{-4} n + 0,961$	104,7	7,0	-1,45	920	33 943
6	$-2,85 \cdot 10^{-4} n + 1,090$	111,7	27,3	-1,45	895	158 785
Всего:			89	—	—	525 801

Табл. 2. Расчет потенциала энергосбережения от очистки нефтепровода во втором режиме

Номер тренда	Зависимость $d_s(n)$, м	Начало интервала n , сут	Продолжительность интервала Δn , сут	Коэффициент эластичности e_d	Среднесуточное электропотребление W , тыс. кВт·ч/сут	Резерв энергосбережения ΔW , кВт·ч
1	$4,18 \cdot 10^{-4} n + 0,922$	298	3,8	-1,40	900	53 846
2	$-0,69 \cdot 10^{-4} n + 1,069$	301,8	12,7	-1,40	925	177 403
3	$10,69 \cdot 10^{-4} n + 0,711$	314,6	10,1	-1,45	915	80 265
4	$-3,91 \cdot 10^{-4} n + 1,185$	324,7	25,8	-1,40	924	189 825
5	$4,65 \cdot 10^{-4} n + 0,885$	350,5	5,7	-1,40	933	69 183
6	$-8,18 \cdot 10^{-4} n + 1,342$	356,2	7,8	-1,40	930	112 136
Всего:			66	—	—	682 659

Выражение для определения приведенного потенциала энергосбережения запишется как

$$\Delta W_{\text{год}} = \Delta W \frac{n_{\text{пр}}}{\sum_{i=1, N} \Delta n_i}, \quad (13)$$

где ΔW – выявленный потенциал энергосбережения за интервал времени $n_{\text{сум}}$, кВт·ч; $n_{\text{пр}}$ – интервал времени приведения потенциала энергосбережения, сут.

Согласно полученным данным, приведенный к годовому периоду потенциал энергосбережения в первом режиме очистки составляет 2 156 тыс. кВт·ч, во втором режиме – 3 775 тыс. кВт·ч. Таким образом, первый режим очистки нефтепровода является энергоэффективнее второго режима на 43 %. Переход со второго режима очистки рассматриваемого участка нефтепровода на первый режим позволит в год сэкономить порядка 450 т у. т. Дальнейшее совершенствование способов очистки нефтепровода позволит дополнительно сэкономить первичное топливо в объеме 600 т у. т. в год, или 0,67 % от технологического потребления ЭЭ.

Заключение

Наличие случайной составляющей погрешности определения эквивалентного диаметра нефтепровода не позволяет с достаточной степенью точности оцени-

вать изменение данного параметра по единичным значениям, соответствующим времени начала и конца очистки нефтепровода.

Разработан метод определения потенциала энергосбережения от периодической очистки парафина магистрального нефтепровода. В основу метода положено построение линейных трендов эквивалентного диаметра нефтепровода на временном интервале очистки нефтепровода и на временном интервале между очистками. Достоинством предложенного метода является исключение влияния случайной составляющей погрешности определения эквивалентного диаметра нефтепровода на прогноз изменения электропотребления, а также учет фактической взаимосвязи между электропотреблением исследуемого участка нефтепровода и усредненным значением его эквивалентного диаметра. Теоретический потенциал энергосбережения от периодической очистки нефтепровода составляет 0,67 % от технологического потребления электроэнергии.

Разработанный метод определения потенциала энергосбережения от периодической очистки парафина магистрального нефтепровода может быть использован для сравнения энергетической эффективности различных способов очистки. В частности, энергоэффективность способов очистки нефтепровода может отличаться на 43 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тронов, В. П.** Механизм образования смолотарафиновых отложений и борьба с ними / В. П. Тронов. – М. : Недра, 1969. – 192 с.
2. **Катанов, Р. Ш.** Технология очистки обвязки нефтеперекачивающих станций от внутритрубных отложений / Р. Ш. Катанов // Надежность и безопасность трубопроводного транспорта : материалы V междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 7–9 июня 2006 г. / Полоц. гос. ун-т ; редкол. : В. К. Липский [и др.]. – Новополоцк, 2006. – С. 227–228.
3. **Ерошкина, И. И.** Применение методов очистки внутренней поверхности нефтепродуктопроводов для увеличения их пропускной способности / И. И. Ерошкина, С. Н. Челинцев, С. П. Макаров // Надежность и безопасность трубопроводного транспорта : тез. докладов IV междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 2003 г. / Полоц. гос. ун-т ; редкол. : В. К. Липский [и др.]. – Новополоцк, 2003. – С. 40–42.
4. Инструкция по очистке магистральных нефтепроводов : утв. РУП «Гомельтранснефть Дружба» 25.07.05. – Гомель. – 14 с.
5. **Анищенко, В. А.** Оценка и нормирование показателей энергоэффективности предприятий трубопроводного транспорта нефти / В. А. Анищенко, Н. В. Токочакова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 233 с.
6. Рекомендации по подсчету экономии электроэнергии в нефтепроводном транспорте при внедрении организационно-технических мероприятий : утв. М-вом нефтяной промышленности Главтранснефть СССР 09.09.85. – Бугульма : НИС УСЗМН, 1985. – 30 с.
7. Методика оценки экономии электрической энергии при проведении энергосберегающих мероприятий в технологическом процессе транспортировки нефти : утв. Белорус. гос. конц. по нефти и химии 23.11.05. – Минск, 2005. – 57 с.

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого
Материал поступил 05.01.2010

A. S. Fikov
**Potential of energy efficiency from
clearing of the oil-trunk pipelines**

The method of defining the potential of energy efficiency from clearing of the oil-trunk pipelines is offered. The method is based on construction of linear trends of the equivalent diameter of the oil pipeline. Influence of the equivalent diameter of the oil pipeline on energy efficiency is considered by means of elasticity coefficient of the electric energy consumption on the equivalent diameter of the oil pipeline.

ЭКОНОМИКА. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 338

Н. С. Желток, канд. экон. наук, доц., Г. Н. Плаксина

ПРЕОДОЛЕНИЕ ПРОБЛЕМ РЕГИОНАЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ КАК УСЛОВИЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

В статье выделены основные проблемы, которые не способствуют проведению эффективной экономической политики и ограничивают условия выхода регионов на траекторию устойчивого развития. Был сделан вывод, что реализация устойчивого развития экономики Республики Беларусь требует учета стартовых условий развития регионов, выявления причин региональной дифференциации, многообразия подходов к решению региональных проблем, усиления взаимосвязей регионов как частей единой государственной экономической системы.

Практика стран с развитой рыночной экономикой свидетельствует, что управление устойчивым развитием экономики должно осуществляться через воздействие государственной политики на социальные, экономические, экологические параметры и опираться на совокупность основных принципов воспроизводства, т. е. тех экономических отношений, которые возникают в процессе производства, распределения, обмена и потребления благ и услуг.

Важность такого подхода обусловлена еще и тем, что в Республике Беларусь по-прежнему сохраняются межрегиональные неравенства. Вместе с тем бытует мнение, что «Республика Беларусь относится к странам с не слишком выраженной региональной дифференциацией, а потому при принятии решений по стратегическим вопросам развития ее экономики, отдельных отраслей и сфер деятельности нет необходимости учитывать территориальные особенности» [1, с. 1]. Такая точка зрения не отражает складывающуюся реальность. Включившийся в начале 90-х гг. механизм рыночной конкуренции разделил регионы Республики Беларусь по их конкурентным преимуществам и недос-

татам. Стала проявляться различная степень адаптации к требованиям рынка и устойчивого развития регионов с разной структурой экономики, обозначилась нехватка государственных инвестиций в региональное развитие, углубилось фактическое неравенство различных регионов в экономических отношениях с центром.

Наличие указанных причин не способствует переходу к устойчивому развитию, которое следует рассматривать как альтернативу сохраняющейся дифференциации регионов. Анализ макроэкономических показателей подтверждает существенные различия регионов по уровню их индустриального развития. Более высокая концентрация промышленного производства в Гомельской (21,6 %), Витебской (17,8 %), Минской (13,7 %) областях и в г. Минске (21,1 %), тогда как на западные регионы страны (Брестская и Гродненская области) приходится 17,2 % объема промышленного производства Республики Беларусь.

В целом промышленность регионов характеризуется традиционным доминированием обрабатывающих отраслей. Однако анализ показал, что за ис-

следуемый период произошли заметные изменения в территориальной структуре промышленного производства. В Витебской и Гомельской областях значительно увеличилась доля топливной промышленности. Существенно сократилась доля экспортоориентированных отраслей, в том числе машиностроения и металлообработки в г. Минске и Витебской области, легкой промышленности во всех регионах. Такая динамика объясняется проводимой политикой либерализации цен, ростом мировых цен на нефть и удорожанием стоимости продуктов ее переработки.

Остается сложным техническое состояние предприятий. Недостаток оборотных средств сопровождается большой изношенностью основных производственных фондов, которая превысила критический уровень. Невысокая технологичность выпускаемой на таком оборудовании продукции значительно уменьшает количество ее потребителей на внешнем рынке, что имеет своим следствием сокращение инвестиций за счет собственных средств, а в условиях ограниченного притока иностранных инвестиций – замедление темпов промышленного производства в среднесрочной перспективе.

Низкие темпы обновления основных производственных фондов, технологическая отсталость, неконкурентоспособность многих видов промышленной продукции обуславливают наличие убыточных и низкорентабельных предприятий. Наибольший удельный вес убыточных предприятий в Брестской, Гомельской и Витебской областях (соответственно 8,2; 8,3 и 8,1 % от общего числа предприятий).

Остаются существенными различия областей и в производстве сельскохозяйственной продукции, обусловленные не только почвенно-климатическими условиями, но и уровнем развития основных отраслей сельскохозяйственной специализации. В производстве мяса лидируют Минская (24,8 %),

Гродненская (19,7 %) и Брестская области (18,9 %), самый низкий удельный вес в Могилевской области (10,9 %). В производстве молока наибольший удельный вес имеет Минская, Брестская и Гродненская области (25,4; 18,6 и 15,3 % соответственно), в производстве зерна – Минская (26,1 %) и Гродненская (17,4 %) области.

Развитие сельскохозяйственного производства в значительной степени зависит от производственного потенциала. Несомненным лидером по размеру производственного потенциала является Минская область, которая имеет самые высокие показатели по наличию основных средств, трудовых ресурсов и сельскохозяйственных угодий (23 % от республиканского). Наименьший размер производственного потенциала имеет Могилевская область – 13 % от республиканского [2, с. 39]. Значительны различия и по качеству земель. Если общий балл кадастровой оценки всех сельскохозяйственных земель республики составляет 26,0 баллов, то максимальный общий балл кадастровой оценки имеют Гродненская (31,7) и Брестская (29,6) области, что соответственно на 29,0 и 14,3 % превышает балльную оценку в Витебской области. В этом регионе короче вегетационный период и самая малая контурность пашни – чуть более 5 га. В среднем по республике размер контура пашни составляет около 14 га.

Однако даже с учетом дифференциации продукции сельского хозяйства, обусловленной природно-климатическими и экологическими факторами, разница между крайними значениями средних душевых объемов сельскохозяйственного производства по регионам значительна: по зерновым культурам – в 2 раза, по картофелю – в 1,5 раза, по реализации мяса – в 1,9 раза, молока – 1,6 раза, яиц – 2,3 раза. Региональные различия в количестве потребляемых продуктов не столь различны, однако они имеются. Степень удовлетворения потребности в продуктах питания в со-

ответствии с физиологическими нормами колеблется от 70 (Витебская область) до 92,3 % (Гродненская область) [3, с. 86].

В целом состояние сельского хозяйства в регионах республики на протяжении исследуемого периода (1990–2007) можно оценить как сложное: валовая добавленная стоимость в ВВП сократилась на 15,3 п. п., выпуск сельскохозяйственной продукции – на 9,7 п. п. Так, в 2003 г. сумма убытков по всей деятельности составляла 191 млрд р. Более половины сельскохозяйственных организаций оказались убыточными (57,9 %), рентабельность их продукции была отрицательной (-6,2 %). Наибольшее число убыточных предприятий приходилось на Могилевскую, Витебскую и Гомельскую области.

В 2004 г. в основном за счет присоединения отстающих сельскохозяйственных предприятий к рентабельным число убыточных хозяйств сократилось и составило 11,7 %. В 2007 г. таких предприятий осталось 1,3 %, и рентабельность их продукции оставалась отрицательной (-0,04 %). Просроченная кредиторская задолженность по сравнению с 1995 г. возросла на 20,3 п. п. Более устойчиво развивался аграрный сектор Брестской области.

Основная причина неэффективности сельскохозяйственного производства – низкая продуктивность земледелия и животноводства, высокие издержки производства на единицу продукции, отсутствие необходимых инвестиций. Инвестиции в основной капитал в сельском хозяйстве в 2007 г. составили только 14,2 % от общего объема инвестиций по отраслям экономики и не более 60 % от уровня 1990 г. [4, с. 426].

Неравномерно распределяются инвестиции и по регионам. Так, в 2007 г. наибольший объем инвестиций в основной капитал получили г. Минск, Минская и Гомельская области (24,7; 16,1 и 15,5 % от общего объема инвестиций соответственно), наименьший объем – Витеб-

ская область (10,1 %) [4, с. 428]. Лидирующие места в рейтинге регионов по такому показателю инвестиционных преимуществ как инвестиции на душу населения стабильно занимают г. Минск и Минская область (132,0 и 106,3 % от среднереспубликанского уровня соответственно). Недостаточный уровень инвестиций имеет Витебская область – только 76,7 % от среднереспубликанского уровня. К факторам, негативно повлиявшим на данный показатель, можно отнести высокий финансовый риск, медленную диверсификацию и реструктуризацию промышленности в регионах.

Необходимым условием эффективного использования инвестиций в регионах является формирование полноценного предпринимательского сектора. Малые предприятия имеют такие экономические преимущества, как лучшая приспособляемость к рыночным условиям, более низкий уровень издержек производства и реализации, более высокая адаптивность к требованиям научно-технического прогресса и изменениям экономической конъюнктуры. В 2007 г. по сравнению с 2000 г. число малых предприятий в республике увеличилось в 1,8 раза.

Анализ статистических данных показывает, что регионы Республики Беларусь также имеют существенные различия в развитии малого предпринимательства. Институциональное преимущество по количеству малых предприятий имеет только г. Минск – 44,1 %, самый низкий удельный вес малых предприятий в Гродненской области – 7,6 %. Сложившаяся в начале 90-х гг. отраслевая структура малых предприятий в последние годы практически не изменилась. Большая часть их приходится на сферу торговли и общественного питания.

Для высоких темпов социально-экономического развития Республики Беларусь необходимо задействовать региональные факторы эффективности инновационного развития. Наибольшее количество инновационно-активных

предприятий сосредоточено в г. Минске (21,3 % от общего числа инновационно-активных субъектов хозяйствования), наименьшее количество – в Гродненской области (только 9,5 %) (рис. 1).

Большую инновационную активность в регионах проявляют предприятия таких отраслей, как машиностроение и металлообработка, пищевая, легкая, промышленность строительных материалов. Из этого следует, что реализация инновационной деятельности не ориентирована на первоочередное развитие высокотехнологичных отраслей,

относящихся к перспективным технологическим укладам (современные информационные технологии, биотехнологии, нанотехнологии и др.).

К числу основных факторов, препятствующих инновационной деятельности предприятий, можно также отнести недостаток собственных денежных средств и финансовой поддержки со стороны государства, высокую стоимость нововведений, низкий инновационный потенциал большинства организаций.

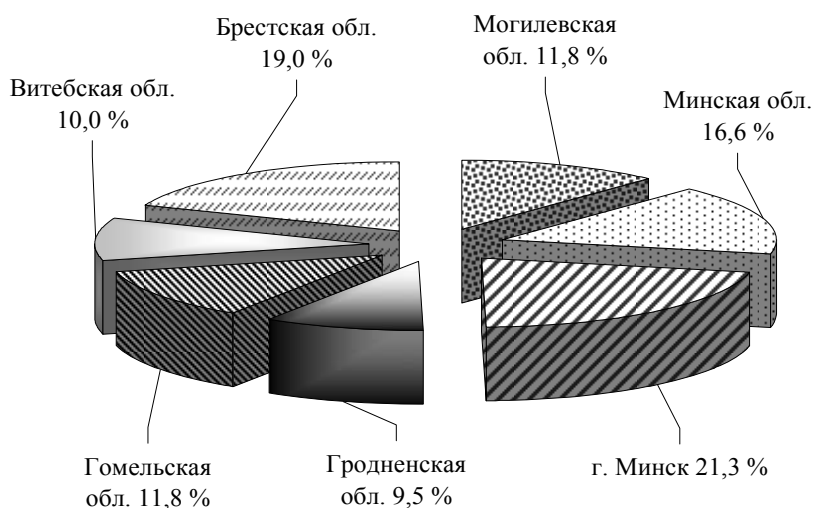


Рис. 1. Структура инновационно-активных предприятий по регионам Республики Беларусь в 2007 г.

Сохранению дифференциации регионов способствует и уровень развития внешнеэкономических связей. Различия проявляются как в количественном (разной степенью открытости экономики), так и в качественном аспекте (территориальной дифференциацией экспортно-импортных операций по товарной номенклатуре). В региональной структуре внешнеторгового оборота лидером является г. Минск, его доля на протяжении длительного периода – 40–45 %.

Наибольшая доля экспортных поставок в 2007 г. приходилась на г. Минск, Гомельскую и Минскую области (соответственно 32,0, 22,1 и 15,1 %). Удельный

вес импорта указанных областей в общем объеме импорта республики составляет соответственно 30,3, 5,6 и 5,2 %. Значительно отстают в наращивании экспортного потенциала Гродненская и Брестская области. В целом экспортные позиции регионов характеризуются узкой товарной номенклатурой.

Территориальная асимметрия внешнеторгового оборота повторяет картину различий в уровне производства продукции промышленности и сельского хозяйства. Региональное распределение экспортных поставок показывает неиспользуемый потенциал Брестской и Гродненской областей, недоста-

точную вовлеченность в производство экспортной продукции местных топливно-энергетических и сырьевых ресурсов. В целом экспортные позиции регионов характеризуются узкой товарной номенклатурой.

Одним из самых динамично развивающихся секторов экономики регионов является торговля. Наиболее интенсивно она осуществлялась в Минской области и г. Минске, где фактический объем продаж в 2007 г. достиг 120,7 и 119,3 % соответственно. Значительную долю торгового оборота республики (30,1 %) традиционно обеспечивает г. Минск. Доля областей колеблется от 10,2 % (Могилевская область) до 13,2 % (Минская область). Торговым организациям принадлежит 66,3 % объема продаж в регионах. В Брестской области эта доля составляет 69,7 %, а в Могилевской – только 61,5 %.

Дифференцированы в региональном разрезе и темпы роста заработной платы, что естественным образом влияет на неравномерность социально-экономического развития регионов Республики Беларусь. По темпам роста этого показателя выделяются Минская, Витебская и Гомельская области, что обусловлено концентрацией валообразующих предприятий промышленности в этих областях. В целом для экономики регионов характерна устойчивая тенденция опережающего роста заработной платы по сравнению с производительностью труда, что отрицательно сказывается на эффективности производства. Если в 2007 г. рост реальных денежных доходов в республике составил 10,2 %, то производительность труда – только 7,9 % [5, с. 43].

Специфика темпов роста оплаты труда связана с неблагоприятным экономическим состоянием предприятий, что формирует противоречивость в рыночном развитии производства, способствует сохранению необоснованной межотраслевой дифференциации в опла-

те труда, которая в Республике Беларусь достигает 3,1 раза. Кроме того, заработная плата у жителей столицы почти на 30–35 % больше, чем в других городах республики. В 2007 г. ее уровень по отношению к среднереспубликанскому составил 129,8 %, самый низкий уровень заработной платы в Брестской области – только 88,1 %. Существенные различия отмечаются и в темпах ввода в эксплуатацию жилья. Самый высокий показатель наблюдается в г. Минске и Минской области, что соответственно в 2,3 и 2,1 раза больше, чем в Могилевской области.

Возможности социально-экономического развития регионов зависят от их финансового потенциала, который определяется финансовым положением хозяйствующих субъектов (рис. 2).

В лучшем финансовом положении находятся хозяйственные комплексы Гомельской, Минской областей и г. Минска, на долю которых приходится 68 % получаемой в стране прибыли. Брестская и Гродненская области, менее развитые в индустриальном отношении, имеют более низкий удельный вес в общей сумме прибыли. На долю Могилевской области приходится только 6,9 % от общей прибыли.

Сохранению неравенства регионов республики способствует высокий уровень централизации управления, который позволяет «перекачивать» через республиканский бюджет значительные финансовые ресурсы. С одной стороны, это дает возможность государству оказывать помощь регионам, находящимся в наиболее тяжелом положении, а с другой – регионы оказываются в серьезной финансовой зависимости от центра, что сковывает инициативу местных органов управления в самостоятельном решении региональных проблем. В конечном итоге порождаются новые проблемы развития территорий.

Практика показывает, что при сохранении высокой организационной и

финансовой централизации у государства возникает соблазн содержать многочисленный аппарат управления. Это приводит к тому, что средства и ресурсы, выделяемые на поддержку регионов, распре-

деляются по различным министерствам и ведомствам, не давая должного эффекта. Сложившиеся стереотипы управления содержат в себе потенциальные угрозы устойчивому развитию.

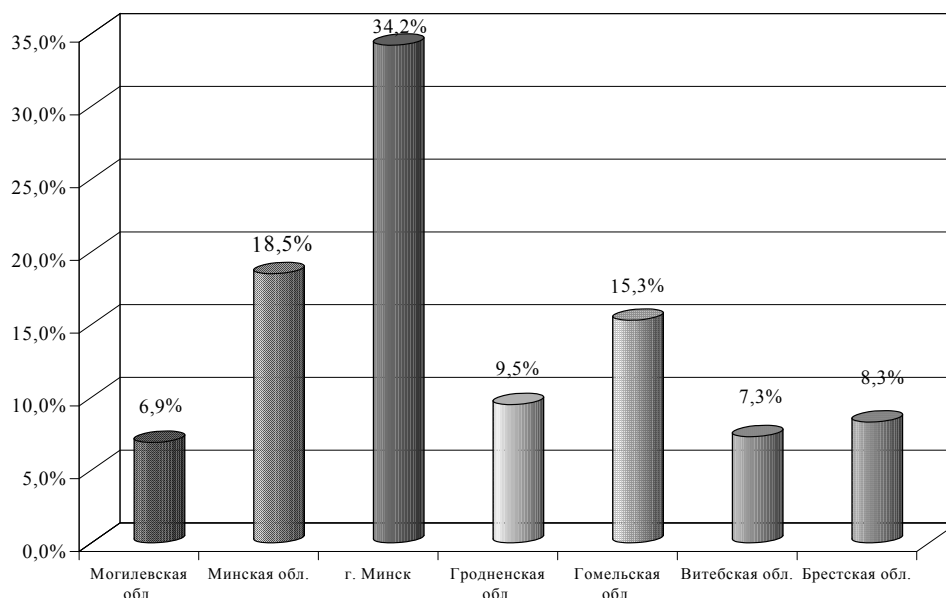


Рис. 2. Доля прибыли, приходящаяся на регионы в 2007 г.

В методологическом плане устойчивое развитие необходимо рассматривать как объект управления, а главное место в этом процессе должно отводиться государственной системе управления развитием территориальных образований. Однако действующая система управления не в полной мере отвечает требованиям эффективного развития территориальных образований. Поэтому одной из основных задач регионального уровня должна стать разработка программ и стратегий устойчивого развития регионов, которые, несмотря на различия стартовых условий, должны содержать ряд схожих направлений. Среди них:

- оценка места региона в национальной экономике;
- анализ потенциала региона, угроз и рисков, факторов, сдерживающих развитие;
- система приоритетов развития, в

том числе их сочетания;

- цели и задачи развития;
- основные направления развития ведущих отраслей и инновационной деятельности;
- социальная и экологическая политика, охрана окружающей среды;
- развитие внешнеэкономических связей, приоритетные направления интеграции регионов в мировую экономику.

Наличие сходства региональных проблем, отражающих сложившееся понимание предмета региональных стратегий, дает возможность республиканским органам активизировать работу по реализации тех конкретных проблем, которые связаны с местными особенностями. Среди первоочередных мер такого характера должны быть:

- создание условий для увеличения доли наукоемких отраслей, особенно в регионах с высоким научно-техни-

ческим потенциалом (г. Минск, Витебская и Гомельская области);

- реструктуризация промышленности в тех регионах, которые максимально зависят от внешних поставок ресурсов, ускорение темпов внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий (Витебская, Гомельская, Могилевская области);

- создание новых производств и развитие новых видов деятельности, ориентированных на эффективное использование местных возможностей, расширение сферы приложения труда в соответствии с региональными условиями: обслуживание транспортных коридоров, туризм, рекреационная деятельность и другое (Брестская, Гродненская, Витебская области);

- помощь по преодолению кризиса производства в отстающих регионах и районах с худшими природными условиями (сельскохозяйственные районы с низким производственным потенциалом, малые города с моноструктурной экономикой, регионы, пострадавшие от последствий катастрофы на ЧАЭС);

- поддержка наиболее отстающих в социальном отношении регионов, укрепление сферы социальных услуг в сельской местности и малых городах;

- обеспечение занятости населения малых городов и поселков городского типа за счет преимущественного размещения в них небольших предприятий;

- осуществление комплекса мер по реабилитации загрязненных территорий, максимальному снижению вредного воздействия катастрофы на ЧАЭС на природную среду и население.

Указанные задачи вытекают из Концепции государственной региональной экономической политики Республики Беларусь [6, с. 5–6], научных публикаций [7, с. 3].

Вывод из проведенного анализа очевиден. Устранение различий в развитии регионов необходимо рассматривать как одно из условий перехода к ус-

тойчивому развитию. Суть этого вопроса состоит не столько в том, чтобы свести к минимуму неравенства, а в том, чтобы создать равные условия для устойчивого экономического роста. Регион должен не только производить ряд общественных благ, но и формировать нужную среду, привлекать и создавать ресурсы, обеспечивать их эффективное использование.

Анализ научной литературы свидетельствует, что проблемы ослабления региональной дифференциации могут решаться разными путями [8, с. 72]. Первый – минимизация роста отставания менее развитых регионов от сильных. При этом дифференциация будет увеличиваться, но более низкими темпами. Второй – сохранение сложившихся различий между регионами с помощью мер государственной поддержки, которые будут дополнять и стимулировать рыночную активность в наиболее слабых регионах. Третий – создание с помощью селективных мер в слабых регионах возможностей более быстрого развития, чем изначально удавалось сильным регионам. Речь идет о более быстрых темпах роста тех индикаторов, по которым было зафиксировано отставание от сильных регионов. Это направление позволит коренным образом решить проблему снижения региональной дифференциации, создать предпосылки перехода экономики к устойчивому развитию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шелепова, Н. П. Экономическая политика государства должна учитывать интересы регионов / Н. П. Шелепова // Национальная экономическая газета. – 2001. – № 40. – С. 1.
2. Лешиловский, П. В. Методы оценки совокупного производственного потенциала сельскохозяйственных предприятий и использование их результатов в практической деятельности / П. В. Лешиловский, Т. В. Киян // Белорусский экономический журнал. – 2008. – № 4. – С. 39.
3. Петрович, М. В. Региональная продовольственная самодостаточность (методологи-

ческая модель) / М. В. Петрович // Проблемы управления. – 2008. – № 2. – С. 86.

4. Статистический ежегодник Республики Беларусь, 2008 / М-во анализа и статистики Республики Беларусь. – Минск, 2008. – С. 426–428.

5. Социально-экономическое развитие Республики Беларусь : итоги девяти месяцев 2007 г. // Экономический бюллетень. – 2008. – № 11. – С. 43.

6. Концепция государственной региональной экономической политики Республики Беларусь. – Минск, 2000. – С. 5–6.

7. Шелепова, Н. П. Экономическая политика государства должна учитывать интересы регионов / Н. П. Шелепова // Национальная экономическая газета. – 2001. – № 40. – С. 1–3.

8. Суспицын, С. Проблемы методического обеспечения конкретных направлений государственной региональной политики / С. Суспицын // Российский экономический журнал. – 2002. – № 11. – С. 72.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 29.09.2009

N. S. Zheltok, G. N. Plaksina
Overcoming problems of regional
differentiation as the condition of the
sustainable development of Belarus

In the article the basic problems which do not promote carrying out effective economic policy and limit conditions of an exit of regions on a sustainable development direction are given in the article. The conclusion has been drawn that realization of a sustainable development of the economy of Belarus demands taking into account starting conditions of development of regions, revealing the reasons of regional differentiation, variety of approaches to the decision of regional problems, strengthening interrelations of regions as parts of a single state economic system.

Редакционная коллегия

Главный редактор	д-р техн. наук, проф. И. С. Сазонов
Зам. главного редактора	д-р техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко
Зам. главного редактора	канд. техн. наук, проф. А. А. Жолобов
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 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, доц. А. М. Даньков, д-р биол. наук, доц. А. М. Карабанов, 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. В. И. Луковников, д-р техн. наук, проф. В. А. Новиков, д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Редько, д-р техн. наук, проф. М. Ф. Пашкевич, д-р техн. наук, доц. С. Д. Семенюк, д-р физ.-мат. наук, проф. А. Б. Сотский, д-р техн. наук, проф. В. П. Тарасик, д-р техн. наук, проф. Б. И. Фираго, д-р физ.-мат. наук А. В. Хомченко

Подписано в печать 09.03.2010. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать трафаретная. Усл.-печ. л. 22.56. Уч.-изд. л. 20. Тираж 100 экз. Заказ № 186.

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», 2010