РАЗДЕЛ 2. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.9

Линчевский П. А., Новак Г. В., Шрон Л. Б., Богуцкий В. Б., Шрон Б. Л.

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЕМ ЧАСТИЧНО РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА

У статті наведені результати експериментального дослідження з впливу розмірів масляних кишень на час приробленння і величину зносу тертьових поверхонь.

Ключові слова: *масляний карман, мікрорельєф, поверхні тертя, зношування.*

В статье приведены результаты экспериментального исследования по влиянию размеров масляных карманов на время приработки и величину износа трущихся поверхностей.

Ключевые слова: *масляный карман, микрорельеф, поверхности трения, износ.*

The results of the pilot study on the effect of the size of the oil pockets on the running-in time and the wear of the rubbing surfaces.

Key words: *oil pocket, microrelief, surface friction, wear.*

Постановка проблемы. Среди применяемых решений, направленных на повышение эксплуатационных характеристик пар трения, особая роль принадлежит технологическим методам обработки поверхностей трения. Не изменяя конструкции машин и применяя одни и те же конструкционные материалы и смазки, технологическими методами обработки трущихся поверхностей можно значительно повысить как общую долговечность машин, так и межремонтные сроки их эксплуатации.

В последнее время широкое распространение получил метод нанесения на такие поверхности регулярного или частично регулярного микрорельефа (ЧРМР). В большинстве случаев для этого применяется универсальный метод вибрационного накатывания. Опыт эксплуатации показывает, что такие поверхности первоначально получают эффект сокращения интенсивности износа, но в дальнейшем он быстро теряется. Это объясняется недостаточной глубиной получаемого профиля.

В то же время существуют методы лезвийного образования дискретных углублений, или масляных карманов, обеспечивающих их достаточную глубину. Также следует отметить, что с размерами масляных карманов функционально связана схема расположения этих карманов на поверхности трения.

Таким образом, анализ методов повышения износостойкости поверхностей трения с нанесением на указанные поверхности регулярного или частично регулярного микрорельефа требует совершенствования технологии формирования такого профиля.

Анализ литературы. Метод формирования регулярного и частично регулярного микрорельефа с заданными параметрами масляных карманов, полученных с помощью лезвийной обработки, к настоящему времени мало изучен, а имеющиеся данные не систематизированы или носят противоречивый характер.

Цель данной **работы** заключается в разработке нового способа формирования на поверхности трения коротких и глубоких масляных карманов (МК).

Изложение основного материала. Теория нового способа построена на применении схемы вихревого попутного фрезерования МК [1]. Этот способ позволяет получать масляные карманы длиной 1,0–1,5 мм, глубиной 0,5–0,7 мм с шагом между ними порядка 2–4 мм. Поверхности трения с таким микрорельефом сохраняют повышенную маслоемкость и износостойкость на всем протяжении срока эксплуатации машин и механизмов различного назначения. При этом параметры ЧРМР существенно влияют на прирабатываемость пар трения, темп и общую величину износа.

Для экспериментальной проверки была подготовлена серия образцов с различными параметрами поверхности трения. Сравнительным испытаниям подвергались три вида сеток МК (рис. 1).

Главным признаком этих сеток является наличие либо отсутствие касания или частичного перекрытия рядов МК в направлении относительного движения деталей в процессе трения. На трех из четырех сравниваемых образцов наносилась сетка масляных карманов, имеющих глубину 0,5 мм и длину 4 мм. Расстояние между карманами изменялось в зависимости от рисунка (вида) сетки с учетом постоянства относительной площади, занимаемой МК.

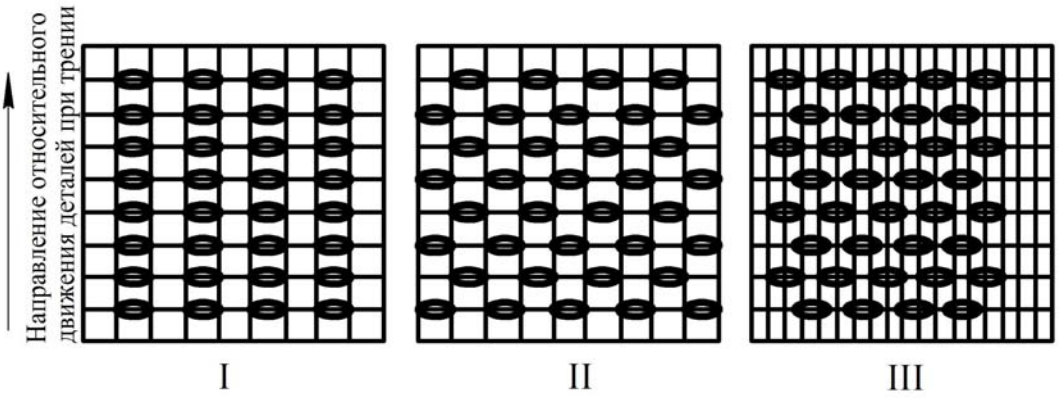

Рис. 1. Виды сеток расположения масляных карманов (МК): I – ряды МК не касаются друг друга; II – ряды МК касаются; III – ряды МК частично перекрываются.

Четвертый образец, как и три других, имел шлифованную поверхность с шероховатостью R_a = 0,32–0,16 мкм, но без МК, и служил в качестве контрольного при оценке эффективности нанесенных на другие образцы частично регулярных микрорельефов.

Типичная диаграмма зависимости параметров износа от вида сетки МК приведена на рис. 2. Как видно на диаграмме, наличие масляных карманов на поверхностях трения даже без оптимизации их параметров существенно повышает износостойкость деталей. Приработочный износ уменьшается до 3 раз, а длительность приработки – в 1,5–2 раза.

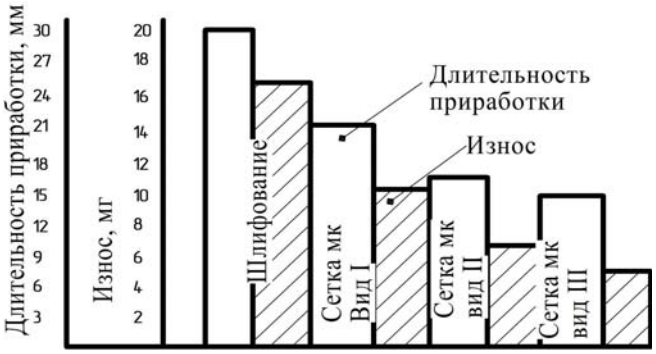

Рис. 2. Диаграммы зависимости длительности приработки и приработочного износа от вида сетки МК.

Вместе с тем приработка определяет характер всей дальнейшей работы пары трения. От нее зависят величина общего износа, темп и величина нормального износа, температура в зоне трения и другие параметры износа. Лучшие результаты дают сетки с касающимися и частично перекрывающимися рядами МК, т. е. сетки II и III видов. В сетке МК I вида менее благоприятными являются условия образования сплошной масляной пленки, что приводит к увеличению износа деталей. Сетка II вида дает результаты примерно на 10% хуже, чем сетка III вида. Однако в случае необходимости технологического управления темпом износа различных участков поверхности трения за счет уплотнения или разрежения сетки МК, предпочтение следует отдавать сетке II вида, позволяющей получать более короткие масляные карманы.

После выбора лучшего вида сетки МК проводилась серия экспериментов, где в качестве основных параметров, влияющих на износостойкость поверхностей трения с масляными карманами, были выбраны их относительная площадь и маслоемкость. Определяются эти параметры отношением фактических величин площади и объема карманов к площади соприкосновения трущихся поверхностей. Относительная площадь МК выражается в процентах, а относительный объем – в мм^3, приходящихся на КИМ площади трения в мм^2.

По результатам эксперимента устанавливались значения длительности приработки и приработочного износа образцов. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Экспериментальные значения длительности приработки и приработочного износа.

№ опыта	Относительная площадь МК, X_1/S_k		Относительный объем МК, X_1/V_k		Длительность приработки, мин.	Износ, мг
	единиц λ_1	%	единиц λ_2	мм^3		
1	0	10	0	10	24,8	11,3
2	1,72	27,2	1,0	20	21,2	9,3
3	0	10	2,0	30	23,7	10,2
4	1,72	27,2	3,0	40	18,5	7,4
5	3,44	44,4	2,0	30	19,4	8,8
6	3,44	44,4	4,0	50	16,3	6,7
7	1,72	27,2	5,0	60	19,1	8,6

Анализируя полученные результаты, можно предположить, что оптимальные значения площади и объема масляных карманов по критерию «износа» должны находиться вблизи точки, лежащей в нижней части графика (рис. 3). Этой точке соответствуют S_k = 35% и V_k = 45 мм^3.

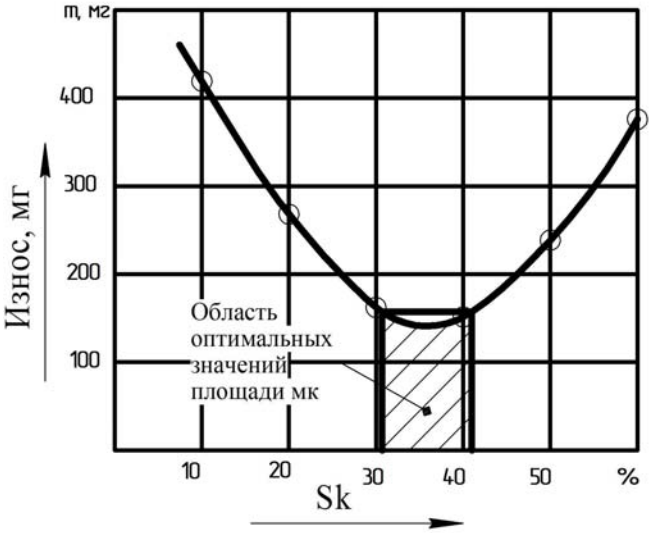

Рис. 3. Влияние площади МК на износ образцов после 20000 циклов истирания.

Дополнительный эксперимент, поставленный при указанных значениях S_k и V_k, дал следующие результаты:

- длительность приработки – 14,7 мин.;
- приработочный износ – 5,1 мг.

Обобщая полученные результаты, можно рекомендовать в качестве оптимальных параметров масляных карманов такие их значения:

- вид сетки – II;
- относительная площадь МК – 30–40%;
- относительный объем МК – 40–50 мм^3 на 1000 мм^2 поверхности трения.

Влияние площади масляных карманов па износостойкость образцов из чугуна СЧ40 исследовалось не только в условиях приработочного износа, но и при нормальном износе в течение длительного времени. Так, на рис. 3 представлены результаты износа образцов после 20000 циклов истирания. Относительный объем МК во всех экспериментах оставался постоянным и был на уровне 50 мм^3 на 1000 мм^2 поверхности трении. Нагрузка и скорость относительного скольжения были также постоянными (нагрузка – 150 Н, скорость скольжении – 10 м/мин., смазка – веретенное масло). Как и в условии их приработочного износа, так и при длительном истирании, область оптимальных значений площади, занимаемой масляными карманами, находится вблизи уровни 35% (в эксперименте от 32 до 42%). Это позволяет с большой степенью достоверности и надежности рекомендовать найденный диапазон оптимальной относительной площади масляных карманов для практики.

Выводы.

1. Установлена зависимость длительности приработки от вида сетки масляных карманов.

2. Экспериментально установлено влияние размеров масляных канавок и параметров регулярного профиля на время приработки и износ трущихся поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Линчевский П. А. Повышение износостойкости тяжелонагруженных деталей на основе разработки теории и технологии нового способа формирования частично регулярного микрорельефа на поверхностях трения / П. А. Линчевский, Г. В. Новак, В. А. Варивода // Известия Академии инженерных наук Украины. Спец. выпуск отделения «Тяжелое и транспортное машиностроение». – 1997. – С. 17–25.

УДК 621.923

Богуцкий В. Б., Шрон Л. Б., Шрон Б. Л., Богуцкий Б. В.

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ШЕРОХОВАТОСТИ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

У статті наведена методика розрахунку шорсткості поверхні при обробці шліфувальним кругом із заданою зернистістю.

Ключові слова: *мікрорельєф, зернистість, шорсткість, обробка, шліфування, радіус абразивного зерна, розрахунок.*

В статье приведена методика расчета шероховатости поверхности при обработке шлифовальным кругом с заданной зернистостью.

Ключевые слова: *микрорельеф, зернистость, шероховатость, обработка, шлифование, радиус абразивного зерна, расчет.*

The article describes the method of calculation of the surface roughness in the processing of a grinding wheel with a given grain size.

Key words: *microrelief, grain, roughness, grinding, abrasive grain radius, the calculation.*

Постановка проблемы. Процессы шлифования имеют сложную стохастическую природу, что приводит к разбросу показателей качества изделий и не позволяет использовать все возможности финишных методов. Микрорельеф шлифованной поверхности представляет собой совокупность отображений в материале заготовки поверхностей резания, образованных при движении режущих кромок инструмента в пространстве обрабатываемой заготовки. Форма единичных рисок определяется формой режущих кромок, особенностями контакта с материалом поверхности.

Анализ литературы показал, что аналитические зависимости для определения важнейших параметров шероховатости поверхности при условии, что случайный процесс, описывающий ординаты, является стационарным и нормальным, получены в работах Ю. Р. Витенберга, А. П. Хусу и Ю. В. Линника [4, 9, 14]. Параметры шероховатости вычислены по корреляционным функциям. Вид функции принимается известной, а ее коэффициенты определяются на основе экспериментальных исследований процесса шлифования. Основы прогнозирования важнейших параметров шероховатости поверхности по технологическим факторам рассмотрены работах А. В. Королева [6] и Ю. К. Новоселова [12; 13]. Известные зависимости с учетом влияния на неровности процессов, возникающих в динамической системе, существенно уточнены в работе [12].

Цель статьи – совершенствование методики расчета параметров шероховатости шлифованной поверхности на основе данных о зернистости шлифовального круга.

Изложение основного материала. В работе [12] расчет параметров шероховатости выполняется на основе функционалов, полученных при теоретическом анализе процессов формообразования поверхностей.

1. Среднее арифметическое отклонение профиля R_a

$$R_a = \frac{\sqrt{2V_u H_u^{3/2}}}{\pi^2 K_c (V_k \pm V_u) n_g \sqrt{D_э \rho_g} \sum_{i=0}^{n} (W_m - i\Delta r)^{3/2}} \text{ при } \Delta r < W_m; \quad (1)$$

$$R_a = \frac{0{,}25 V_u^{0,4} t_f^{0,6}}{K_c^{0,4} (V_k \pm V_u)^{0,4} n_g^{0,4} D_э^{0,2} \rho_g^{0,2}} \text{ при } \Delta r \geq W_m, \quad (2)$$

где W_m – расстояние от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля, которое вычисляется из условия $y_m = 0$, $P(M) = 0{,}5$, $G_k \sum_{i=0}^{n} (W_m - i\Delta r)^{\nu} - \ln 2 = 0$, при величине радиального съема металла $\Delta r \geq W_m$ $W_m = \left(\frac{\ln 2}{G_k}\right)^{1/\nu}$, где

$$G_k = \frac{\sqrt{\pi D_э}\,\Gamma(m+1)\Gamma(\chi)\chi K_c C_b (V_k \pm V_u) n_g}{\Gamma(m+\chi+3/2) V_u H_u^{\chi}}. \quad (3)$$

При частных значениях $m = 0{,}5$, $\chi = 1{,}5$ зависимость (3) принимает вид:

$$G_k = \frac{0{,}598\sqrt{\pi \rho_g D_э} K_c (V_k \pm V_u) n_g}{V_u H_u^{1,5}}; \quad (4)$$

$$\Delta r = \frac{t_f^2}{1{,}478 t_f + \dfrac{13{,}66 V_u}{K_c (V_k \pm V_u) n_g \sqrt{D_э \rho_g}}} \quad (5)$$

$$t_f = 0{,}739\Delta r + \sqrt{0{,}546(\Delta r)^2 + \frac{13{,}66 V_u \Delta r}{K_c (V_k \pm V_u) n_g \sqrt{D_э \rho_g}}}, \quad (6)$$

где в формулах (1), (2), (3), (4), (5), (6):

K_c – коэффициент стружкообразования (он показывает, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется и образует по краям риски навалы);

n_g – количество вершин зерен на единицу поверхности рабочего слоя круга;

H_u – величина слоя рабочей поверхности круга по глубине, в пределах которого подсчитывается число абразивных зерен n_g;

$P(M)$ – вероятность удаления металла;

m и χ – показатели степенной зависимости;

ρ_g – радиус округления вершины зерна;

V_k – скорость круга;

V_u – скорость детали;

$D_э$ – эквивалентный диаметр;

Δr – радиальный съем металла.

Уравнения (1) и (2) по своей структуре и величине показателей степени близки к имеющимся в литературе степенным зависимостям, но в отличие от них отражают физическую природу процесса формообразования.

2. Наибольшая высота неровностей профиля R_{max} и высота неровностей профиля по десяти точкам R_z рассчитываются по величине слоя, в котором распределена шероховатость поверхности, и математическим ожиданиям расстояний от верхней границы слоя до пяти высших точек профиля и расстояний от нижней границы слоя до пяти низших точек профиля.

Для стационарного процесса, близкого к нормальному, можно считать, что расстояния от верхней границы слоя шероховатости до наиболее выступающих вершин профиля распределены по законам, аналогичным распределению расстояний от впадин до нижней границы слоя. В этом случае математическое ожидание значений параметров R_{max} и R_z рассчитываются как

$$M[R_{max}] = H - 2\sqrt{\frac{2V_u t_f^{3/2}}{3n_g (V_k \pm V_u) L \sqrt{D_э}}}; \quad (7)$$

$$M[R_z] = H - 2{,}95\sqrt{\frac{V_u t_f^{3/2}}{n_g (V_k \pm V_u) L \sqrt{D_э}}}, \qquad (8)$$

где

$$H = t_f - \frac{t_f^2}{1{,}478 t_f + \dfrac{13{,}66 V_u}{K_с (V_k \pm V_u) n_g \sqrt{D_э \rho_g}}}. \qquad (9)$$

3. Расстояние от линии выступов до средней линии и относительная опорная площадь на уровне средней линии определяется по параметрам кривой опорной поверхности и среднему арифметическому отклонению профиля:

$$R_p = \left[\frac{R_a (v_p + 1) R_{\max}^{v_p}}{2b}\right]^{\frac{1}{v_p + 1}}; \qquad (10)$$

$$t_{R_p} = \frac{R_a (v_p + 1)}{2 R_p}. \qquad (11)$$

Особенностью приведенных зависимостей является то, что при расчетах учитываются не только параметры режимов резания, но и параметры состояния рабочей поверхности инструмента. Одним из таких параметров рабочей поверхности инструмента является радиус округления вершины зерна ρ_g. По данным Д. В. Ваксера [3], Г. М. Ипполитова [5] и ряда других исследователей [8; 11], радиус вершины зерна зависит от материала абразивного зерна, способа изготовления, зернистости, режима правки инструмента.

Для выполнения инженерных расчетов целесообразнее было бы использовать такие характеристики абразивного материала, приведенные в ГОСТ 3647-80 или в ISO 8486-1,2:1996(E), как зернистость или основной размер абразивного зерна B_g. На основе анализа экспериментальных данных, представленных в работах ряда авторов, составлена табл. 1, отражающая зависимость исходного радиуса округления вершин зерен ρ_g от основного размера абразивного зерна B_g.

Аппроксимация в степенную зависимость проводилась на основе данных, приведенных в табл. 1, методом наименьших квадратов.

Таблица 1.

Исходные радиусы округления вершин абразивных зерен ρ_g.

Источник	Зернистость по ГОСТ 3647-80 и ISO 8486-1,2:1996(E)										
	16	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
	F80	F60	F54	F46	F36	F30	F24	F20	F16	F12	F10
	Основной размер абразивных зерен B_g, мкм										
	160	240	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
	Исходный радиус округления вершин зерен ρ_{g_0}, мкм										
Байкалов А. К. [1]	13	19		28						114	
Маслов Е. Н.[10]	11	17	25		41			76			
Мурдасов А. В. [11]		19		30			68		97	115	130
Ваксер Д. Б.[3]	14	21		30							
Королев А. В. [7]	12					48			93	119	149
Божко Т. Е. [2]	13	19	27	28	38		60				

Получена экспериментальная зависимость:

$$\rho_g = 0{,}0535 \cdot B_g^{0{,}955}, \qquad (12)$$

где B_g – основной размер абразивного зерна по ГОСТ 3647-80 или ISO 8486-1,2:1996(E), м.

В табл. 2 приведено сопоставление средних значений экспериментальных данных по табл. 1 и значений, рассчитанных по формуле (12); графически это сравнение показано на рис. 1.

Таблица 2.

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений радиусов округления вершин зерен ρ_g.

Источник	Зернистость по ГОСТ 3647-80 и ISO 8486-1,2:1996(E)										
	16	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
	F80	F60	F54	F46	F36	F30	F24	F20	F16	F12	F10
	Основной размер абразивных зерен B_g, мкм										
	160	240	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
	Радиус округления вершин зерен ρ_{g_0}, мкм										
Среднее значение экспериментальных данных по табл. 1	12,6	19	26	29	39,5	48	64	76	95	115,3	139,5
Расчетное значение по (12)	12,8	19,4	24,5	30,7	38,1	47,6	59,6	74,3	92,4	115,4	143
Коэффициент корреляции	0,9988341										
F-критерий	4281,015										
Дисперсия адекватности	0,0016124										
Уровень значимости	0,0000										

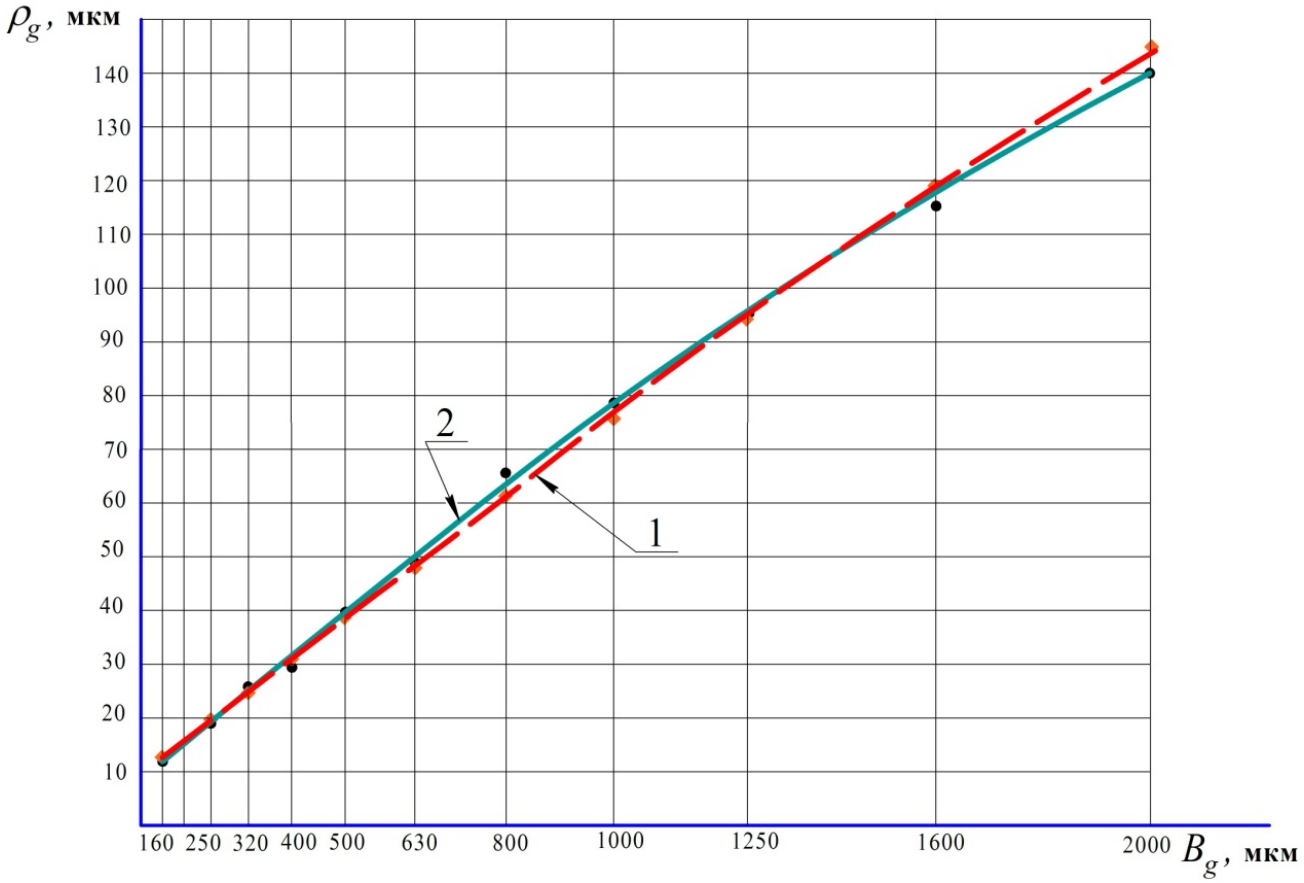

Рис. 1. Сопоставление расчетных (1) и экспериментальных (2) зависимостей между радиусом вершины зерна ρ_g и основным размером абразивных зерен B_g.

Количество зерен n_g на 1 мм^2 поверхности шлифовального круга, входящее в зависимости (1), (2), (4), (7), (8), также во многом определяется основным размером абразивных зерен B_g.

Исходное количество абразивных зерен на рабочей поверхности круга n_g определялось по [15] с учетом содержания абразивных зерен в круге V_g%, основного размера абразивных зерен по ГОСТ 3647-80 B_g, структуры и твердости (для кругов со структурами 5…6 и твердостью СМ1 V_g = 45% [5]) и аппроксимировалось методом наименьших квадратов, что позволило получить зависимость:

$$n_g = 0{,}62 \cdot B_g^{-1{,}99},\ 1/\text{м}^2. \qquad (13)$$

В табл. 3 приведено сравнение количества зерен на 1 мм^2, рассчитанных по [15], и расчетные значения по формуле (13); графически это сравнение показано на рис. 2.

Проверка по коэффициенту корреляции и F-критерию Фишера показала значимость уравнения (13).

Таблица 3.

Сопоставление значений исходного количества абразивных зерен n_g.

	Зернистость по ГОСТ 3647-80 и ISO 8486-1,2:1996(E)										
	16	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
	F80	F60	F54	F46	F36	F30	F24	F20	F16	F12	F10
	Основной размер абразивных зерен B_g, мкм										
	160	240	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
	Количество зерен n_g, 1/мм^2										
Значение по [15]	23,2	9,2	5,7	3,56	2,28	1,44	0,89	0,57	0,366	0,224	0,144
Расчетное значение по (13)	22,4	9,4	5,6	3,57	2,29	1,44	0,89	0,57	0,369	0,226	0,145
Коэффициент корреляции	0,9998058										
F-критерий	23163,75										
Дисперсия адекватности	0,0011158										
Уровень значимости	0,0000										

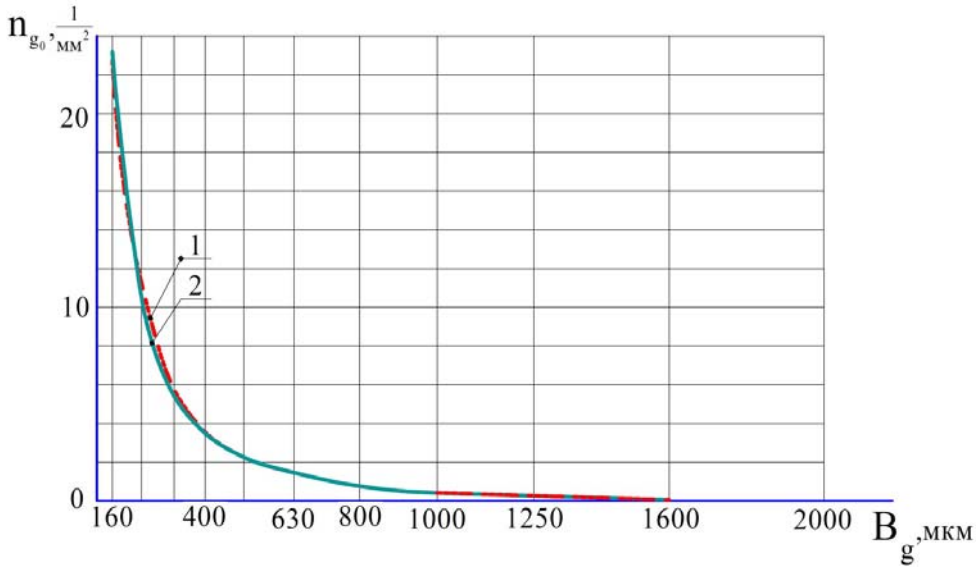

Рис. 2. Сопоставление зависимостей между основным размером абразивных зерен B_g (зернистостью) и количеством зерен на 1 мм^2 поверхности шлифовального круга n_g: 1 – результаты расчета по формуле (13); 2 – по данным [15].

С учетом полученных зависимостей (12) и (13) формулы для расчета характеристик шероховатости поверхности (1), (2), (4), (5), (7), (8) примут вид:

$$R_a = \frac{V_u H_u^{1,5} B_g^{1,513}}{K_c (V_k \pm V_u)\sqrt{D_э} \sum_{i=0}^{n} (W_m - i\Delta r)^{1,5}} \text{ при } \Delta r < W_m; \quad (14)$$

$$R_a = \frac{0{,}544 V_u^{0,4} t_f^{0,6} B_g^{0,605}}{K_c^{0,4} (V_k \pm V_u)^{0,4} D_э^{0,2}} \text{ при } \Delta r \geq W_m, \quad (15)$$

где $\Delta r = \dfrac{t_f^2}{1{,}478 t_f + \dfrac{95{,}254 V_u B_g^{1,513}}{K_c (V_k \pm V_u)\sqrt{D_э}}}$.

$$M[R_{\max}] = H - 2{,}074 \sqrt{\frac{V_u t_f^{1,5} B_g^{1,99}}{(V_k \pm V_u) L \sqrt{D_э}}}; \quad (16)$$

$$M[R_z] = H - 3{,}747 \sqrt{\frac{V_u t_f^{1,5} B_g^{1,99}}{(V_k \pm V_u) L \sqrt{D_э}}}, \quad (17)$$

где

$$H = t_f - \frac{t_f^2}{1{,}478 t_f + \dfrac{95{,}254 V_u B_g^{1,513}}{K_c (V_k \pm V_u)\sqrt{D_э}}} \quad (18)$$

Особенностью полученных уравнений является то, что при расчетах учитываются параметры режима резания, размер зерна шлифовального круга, что позволяет оценить их влияние на параметры шероховатости процесса шлифования.

Выводы.

1. Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей радиуса вершины зерна ρ_g и основного размера абразивных зерен B_g позволило установить зависимость между зернистостью (в маркировке шлифовального круга) и основным параметром зерна.

2. Установленные в работе зависимости позволят при прогнозировании параметров шероховатости шлифованной поверхности использовать в расчетах стандартные данные о зернистости исходя из марки шлифовального круга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов / А. К. Байкалов. – К. : Наукова думка, 1978. – 207 с.
2. Божко Т. Є. Формування поверхневого шару у деталей із порошкових матеріалів при шліфуванні : дис. на здобуття наукового ступеню канд. тех. наук / Т. Є. Божко. – Луцьк, 2011.
3. Ваксер Д. Б. Влияние геометрии абразивного зерна на свойства шлифовального круга / Д. Б. Ваксер // Основные вопросы высокопроизводительного шлифования. – М. : Машгиз, 1960. – С. 96–126.
4. Витенберг Ю. Р. Применение корреляционной теории для оценки шлифованной поверхности / Ю. Р. Витенберг // Вестник машиностроения. – 1969. – Вып. 1. – С. 55–57.
5. Ипполитов Г. М. Абразивно-алмазная обработка / Г. М. Ипполитов. – М. : Машиностроение, 1969, 334 с.
6. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов : Саратов. ун-т, 1975. – 202 с.
7. Королев А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч. I / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов : Саратов. ун-т, 1987. – 160 с.
8. Кремень З. И. Технология шлифования в машиностроении / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабошкин ; [под общ. ред. З. И. Кремня]. – СПб. : Политехника, 2007. – 424 с.

9. Линник Ю. В. Математико-статическое описание неровностей профиля поверхности при шлифовании / Ю. В. Линник, А. П. Хусу // Инженерный сборник АН СССР. – 1954. – № 20. – С. 154–159.
10. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 400 с.
11. Мурдасов А. В. Особенности работы шлифовальных кругов из абразивного зерна разной формы / А. В. Мурдасов, А. М. Вульф // Абразивы и алмазы : научно-технич. реф. сб. – М. : НИИМАШ, 1967. – № 4. – С. 65–69.
12. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
13. Новоселов Ю. К. Образование микрорельефа поверхности при чистовых процессах шлифования / Ю. К. Новоселов // Резание и инструмент. – Харьков, 1974. – Вып. 9. – С. 38–47.
14. Хусу А. П. Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход / А. П. Хусу, Ю. Р. Витенберг, В. А. Пальков. – М. : Наука, 1975. – 344 с.
15. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / [А. Н. Резников и др.] ; под ред. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 391 с.

УДК 628.12

Салиев Э. И., Николенко И. В., Гаффарова Э. У.

ВЛИЯНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ НА НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

У статті проаналізовано ремонтопридатність як властивість надійності систем водопостачання і водовідведення, розглянуто основні фактори ремонтопридатності, представлено підхід до розробки математичної моделі параметрів ремонтопридатності для обґрунтування послідовності робіт по підтримці працездатного стану.

Ключові слова: *система водопостачання та водовідведення, ремонтопридатність, експлуатація, енергетичні ресурси.*

В статье проанализирована ремонтнопригодность как свойство надежности систем водоснабжения и водоотведения, рассмотрены основные факторы ремонтопригодности, представлен подход к разработке математической модели параметров ремонтопригодности для обоснования последовательности работ по поддержанию работоспособного состояния.

Ключевые слова: *система водоснабжения и водоотведения, ремонтопригодность, эксплуатация, энергетические ресурсы.*

The reliability of water and sewer systems is analyzed in the article, maintainability factors are considered, an approach to developing a mathematical model of maintainability parameters is presented for a range of works on workability of technical facilities.

Key words: *water and sewer systems, maintainability, service, energy resources.*

Постановка проблемы. Основной стратегической задачей государства является повышение материального и культурного благосостояния людей. Одно из условий выполнения этой задачи – дальнейшее улучшение жилищных условий.

В частности, данное условие требует увеличения норм водопотребления, уточненных прогрессивных методов расчета систем водоснабжения и водоотведения (СВВ), применения новых типов технического оборудования, арматуры, обеспечивающих надежность, удобство эксплуатации и экономичность расходования энергоресурсов.

Технические решения при проектировании СВВ должны обеспечить подачу требуемого количества воды потребителям с заданными напорами в местах ее отбора при наименьших затратах на их сооружение и эксплуатацию.

Эксплуатация СВВ должна обеспечивать бесперебойную и надежную работу всех сооружений при их высоких технико-экономических показателях с учетом рационального использования материальных и энергетических ресурсов за счет:

- организации оптимальных режимов работы систем, оборудования и агрегатов обеспечивающих интенсификацию их работы, внедрение прогрессивных методов управления и регулирования на основе современных достижений науки и техники;
- обеспечения максимальной степени автоматизации производственных процессов, для исключения потерь воды и непроизводственных затрат времени, энергии, материалов и т.д.;
- организации качественной эксплуатации, своевременного и высококачественного технического сервиса оборудования и машин;
- систематической регистрации, систематизации и изучения причин нарушений в работе, и мониторинга аварий, возникающих в СВВ.

Анализ литературы. Одной из наиболее острых проблем функционирования СВВ Украины в настоящее время является ее неудовлетворительное техническое состояние, вызванное значительным износом основных фондов, а также чрезмерное и неэффективное использование материальных и энергетических ресурсов. Проблемы тесно взаимосвязаны и оказывают негативное влияние как на работу, так и на технико-экономическую эффективность всей подотрасли жилищно-коммунального хозяйства [1].

Согласно информации Академии строительства Украины, по состоянию на 2007 год, каждая пятая насосная станция Украины выработала свой нормативный срок амортизации, четвертая часть водопроводных очистных сооружений требует восстановления или модернизации. Более 30% коммунальных водопроводных и канализационных сетей находятся в аварийном состоянии. Энергетическая составляющая в себестоимости питьевой воды может достигать 50%, а потери воды при ее транспортировании и распределении превышают 30%, при этом непродуктивные потери электроэнергии составляют не менее 25% [2].

Такая ситуация приводит к значительному снижению надежности СВВ и росту аварий, количество которых находится в диапазоне 100…400 аварий в год на 100 км трубопроводов (рис. 1). Этот показатель в странах Западной Европы находится в диапазоне 10…20 аварий на 100 км трубопровода в год [2; 3].

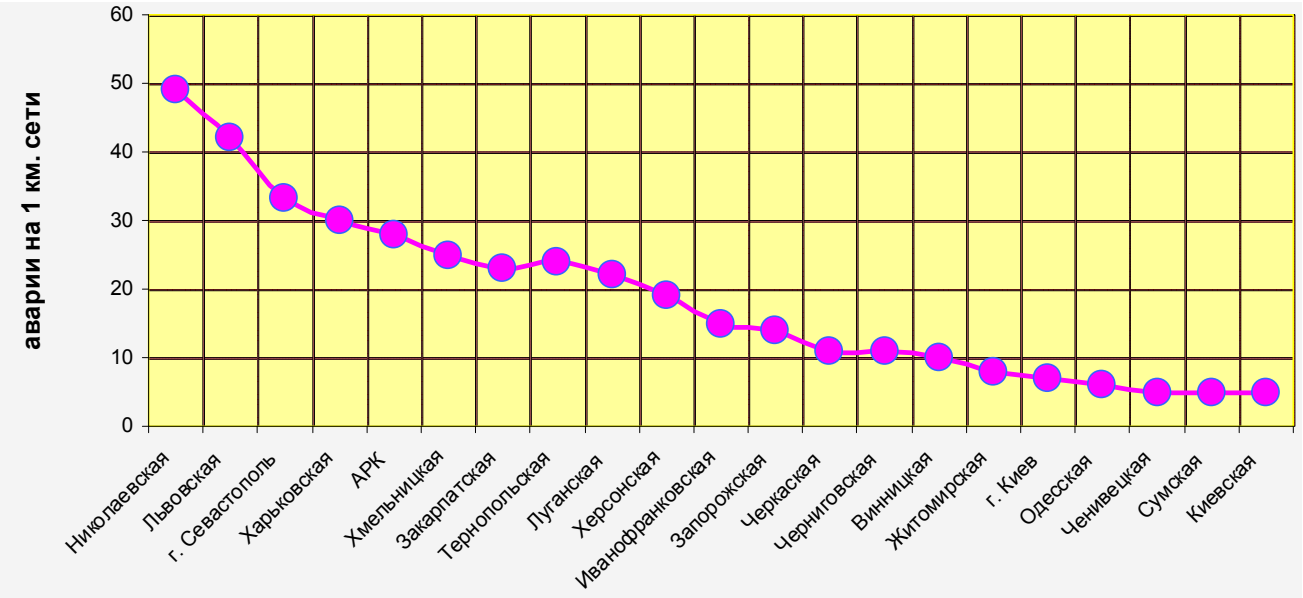

Рис. 1. Аварийность на водопроводных сетях Украины.

Контроль, поддержание и восстановление работоспособного состояния систем водоснабжения и водоотведения является наиболее важной задачей технической эксплуатации для обеспечения требуемого уровня надёжности при заданной долговечности и технико-экономических показателях.

Одним из главных свойств надежности, которое в настоящее время, к сожалению, недостаточно рассматривается для СВВ, является ремонтопригодность [4; 5]. Это свойство надежности заключается в приспособленности технической системы к проведению различных работ по ее техническому обслуживанию и ремонту для обеспечения, сохранения или поддержания рабочих параметров в пределах установленных допусков в течение требуемого интервала времени эксплуатации.

Потери материальных и энергетических ресурсов в СВВ существенно связаны с потерями, которые происходят по причине их низкой надежности, которая обусловлена, в том числе, показателями ремонтопригодности [6; 7].

Целью статьи является описание терминологии, использующейся при изучении ремонтопригодности СВВ, анализ факторов, влияющих на нее, а также построение математической модели для оценки показателей ремонтопригодности.

Изложение основного материала.

Описание терминологии. Современные СВВ представляют собой сложные инженерные сооружения, содержащие комплексы энергетического и гидравлического оборудования и машин, обеспечивающих подачу воды потребителям, а также отвод и очистку сточных вод. Правильное решение инженерных задач в СВВ в значительной степени определяет высокий уровень благоустройства населенных мест, а также благоустройства жилых, общественных и промышленных зданий [8].

Обеспечение надежности СВВ как систем массового обслуживания является одной из ос-

новных задач при их проектировании. Система должна быть запроектирована и построена так, чтобы она не только была способна выполнять свои функции, но и фактически в процессе эксплуатации обеспечивала в заданной степени их бесперебойное выполнение. Так как функцией СВВ является подача потребителям воды в требуемых им количествах (в соответствии с заданным режимом потребления) и требуемого качества, то при фактическом выполнении этих условий можно считать, что система находится в «работоспособном состоянии» [9].

В существующих подходах по проектированию, а также исследованию надежности СВВ основное внимание уделяется показателям безотказности и долговечности. Ни один из этих показателей полностью не может характеризовать надежность восстанавливаемых объектов. Одно из основных требований к таким техническим системам и их элементам – это их приспособленность к техническому обслуживанию и ремонту, осуществляемым с целью поддержания и восстановления долговечности и работоспособности в процессе эксплуатации.

Комплекс работ по поддержанию работоспособности технических объектов составляет техническое обслуживание, а по восстановлению работоспособности и ресурса – ремонт. Техническое обслуживание СВВ включает в себя объем работ, направленных на поддержание исправного или работоспособного состояния ее элементов при подготовке к применению, при хранении и транспортировании или в процессе использования по назначению. Ремонт СВВ и ее элементов представляет собой комплекс работ, направленных на поддержание и восстановление исправного или работоспособного состояния. Поэтому с учетом нынешнего технического состояния СВВ основой их надежности является ремонтопригодность, которая в то же время тесно связана с другими свойствами ее надежности.

Ремонтопригодностью называют свойство технической системы, которое характеризует ее приспособленность к восстановлению состояния исправности, а также сохранению заданных функциональных характеристик методами предупреждения, выявления, а также устранения причин отказов. В более узком смысле под ремонтопригодностью понимают приспособленность технической системы к удобному и быстрому осуществлению отдельных технологических операций при ее обслуживании, ремонте, контроле технического состояния, при разборке и сборке, агрегатов, узлов и деталей устройств, их контроле и замене.

Ремонтопригодность как свойство надежности технической системы закладывается при проектировании, обеспечивается при ее изготовлении, а реализуется в её эксплуатации.

В практике проектирования и эксплуатации различных технических объектов для раскрытия свойства ремонтопригодности применяются следующие основные термины:

- эксплуатационная технологичность;
- технологичность при обслуживании;
- технологичность при ремонтах;
- технологичность при выполнении сервисных работ.

Эксплуатационной технологичностью называют свойство ремонтопригодности технической системы, которое характеризуется её приспособленностью к работам, выполняемым при подготовке элементов системы к использованию, в процессе эксплуатации и по окончанию использования. Использование термина «эксплуатационная технологичность» и соответствующих показателей для общей оценки технической системы имеет практическое значение, так как позволяет характеризировать эксплуатационные свойства её элементов.

Технологичностью при обслуживании называется свойство ремонтопригодности технической системы, которое выражается в ее приспособленности к комплексу работ, выполняемых для поддержания работоспособного состояния в процессе эксплуатации. Свойство «технологичность при обслуживании» связано с такими свойствами оборудования, машин и агрегатов системы, как доступность, легкосъёмность, контролепригодность, блочность, взаимозаменяемость, восстанавливаемость.

Технологичностью при ремонте называют свойство ремонтопригодности технической системы и её элементов, которое характеризуется приспособленностью к ремонтным работам, осуществляемым с целью восстановления их работоспособности и ресурса.

Технологичностью при выполнении сервисных работ называют свойство ремонтопригодности технической системы, которое обеспечивает приспособленность её элементов к выполнению определенных действий:

- работ по регулировке параметров технической системы, ее элементов при подготовке к применению;
- операций и работ в процессе применения для управления рабочими процессами, переключения режимов работы и т. д.;
- работ, которые выполняются после окончания использования элементов технической системы при их снятии из эксплуатации, отключении от источников электропитания, переводе в нерабочее сезонное положение или в положение для хранения.

Анализ факторов ремонтопригодности. Ремонтопригодность СВВ является функцией факторов *конструктивного, производственно-технологического* и *эксплуатационного* характера. Состав каждой из этих групп факторов, их влияние на значение характеристик ремонтопригодности определяются назначением и конструктивными особенностями СВВ, условиями её эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

Конструктивные факторы делятся на следующие группы:

- по возможности их количественной оценки: количественные и качественные;
- по результатам влияния на характеристики ремонтопригодности: влияющие на затраты времени, труда и средств на обслуживание и ремонт, влияющие на аналогичные затраты при изготовлении объектов технической системы.

К конструктивным факторам ремонтопригодности относятся

- рациональная расчленённость системы на обособленно изготовляемые и обслуживаемые конструктивные элементы;
- доступность конструктивных элементов для технического обслуживания и ремонта, особенности расположения агрегатов и их элементов, которые являются объектами систематического контроля, обслуживания и ремонта;
- рациональный выбор материалов, из которых изготавливают конструктивные элементы технической системы, подлежащие замене в процессе технического обслуживания и ремонта;
- рациональное распределение нагрузок, действующих на конструктивные элементы при эксплуатации технической системы;
- рациональная конфигурация, расположение и форма элементов технической системы, позволяющая применять при изготовлении и ремонте современные технологические процессы, значительно повышающие сроки службы;
- рациональное конструктивное оформление элементов технической системы, обеспечивающее их защиту от неблагоприятного воздействия внешней среды, а также неквалифицированного персонала, эксплуатирующего СВВ.

Действия указанных конструктивных факторов часто являются основной причиной потери работоспособности элементов технической системы и потери ее работоспособности в целом.

Анализ факторов ремонтопригодности конструктивного характера показывает, что большинство из них являются управляемыми и существенно влияют на длительность, трудоемкость и стоимость эксплуатации, обслуживания и ремонта. Рациональные конструктивные решения по ремонтопригодности в СВВ являются лишь потенциальными условиями обеспечения требуемого уровня надежности технической системы. Проявляются же эти решения при изготовлении элементов СВВ, её сборке и в процессе эксплуатации.

Производственно-технологические факторы ремонтопригодности оказывают преимущественное влияние на длительность и трудоёмкость осуществления обслуживания и ремонта при эксплуатации технической системы, а также на сроки её службы.

Производственно-технологические факторы ремонтопригодности СВВ делятся на две группы: организационно-технические и технологические.

К первой группе относят факторы, характеризующие уровень организации производства и оказывающие влияние на обеспечение требований ремонтопригодности, заложенных при разработке СВВ и её элементов:

- состояние организации труда и внедрения современных технологических процессов;
- наличие на предприятиях схем системы водоподачи и отвода стоков, современных методов проектирования технологического оборудования для производства, а также сведений об их техническом состоянии;
- наличие на предприятиях систем качества, совершенство применяемых методов контроля предоставляемой услуги, соответствия её нормативным требованиям, квалификации специалистов предприятия.

Производственно-технологические факторы ремонтопригодности характеризуют уровень изготовления элементов СВВ и её монтажа. Они являются основными инструментами обеспечения требуемых свойств технической системы, в том числе и свойств надежности при изготовлении, в процессе эксплуатации, технического обслуживании и ремонта. К этим факторам относятся

- методы достижения и обеспечения точности при изготовлении элементов СВВ, качество сборки элементов и монтажа системы в целом;
- применение при производстве агрегатов и оборудования СВВ современных материалов и технологических процессов, которые обеспечивают требуемые свойства элементам машин и оборудования;
- выбор современных материалов, оборудования и технологических процессов для выполнения работ по обслуживанию и ремонту.

Эксплуатационные факторы ремонтопригодности определяют условия, в которых проявляются свойства конструкции элементов СВВ, заложенные при её проектировании и обеспеченные при изготовлении. Для конкретного вида оборудования, элементов конструкции и условий их использования эксплуатационные факторы определяют количественные значения показателей ремонтопригодности. Различные условия эксплуатации, технического обслуживания и ремонта оборудования, то есть различие в составе и характере действующих эксплуатационных факторов, является причиной различных значений показателей ремонтопригодности для СВВ.

Конструктивные и технологические особенности СВВ с учетом условий эксплуатации предопределяют значение характеристик ремонтопригодности и интенсивность их изменения.

Естественно, что необходимо отдавать предпочтение системе водоснабжения и водоотведения, характеристики которых мало изменяются при изменении условий эксплуатации. С другой стороны, системы водоподачи и водоотвода должны реагировать на осуществляемые в процессе эксплуатации сервисные мероприятия, которые являются одним из важнейших эксплуатационных факторов.

Эксплуатационные факторы ремонтопригодности делятся на две группы: организационного и технического характера.

К факторам организационного характера относятся

- система технического обслуживания и ремонта, устанавливаемая для обеспечения выполнения требований СНиП по надежности СВВ;
- организационные формы технического сервиса и ремонта СВВ, которые могут быть централизованными либо децентрализованными, агрегатными, поточными и др., в зависимости от структуры СВВ, характера ремонтных работ, количества ремонтируемого оборудования, технической оснащенности и т. д.;
- виды, периодичность и содержание сервисных и ремонтных работ, которые определяются принятой системой обслуживания, качеством имеющейся информации об изменении характеристик работоспособности элементов СВВ в процессе эксплуатации, математическим аппаратом, используемым для описания процессов изменения их технического состояния;
- обеспечение материалами и запасными частями для обслуживания и ремонта находящихся в эксплуатации элементов СВВ;
- наличие, полнота и качество эксплуатационно-технической и ремонтной документации для элементов СВВ.

К факторам технического характера относятся

- виды и содержание технологических процессов, которые применяются для технического обслуживания и ремонта СВВ и ее элементов;
- техническая оснащенность работ при техническом обслуживании и ремонте СВВ и ее элементов основным и вспомогательным оборудованием, инструментом, приспособлениями, оснасткой и т.д.;
- оснащенность технических служб устройствами для измерения и контроля показателей работы сооружений, сетей и оборудования, дистанционной сигнализацией функциональных и параметрических отказов СВВ, системами компьютерного сбора, обработки и хранения информации о техническом состоянии и отказах СВВ, средствами диспетчеризации и оперативной связи с оперативными схемами основных коммуникаций, сооружений и средств регулирования, а также наличие АСУ ТП ВКХ.

Построение математической модели обеспечения ремонтопригодности СВВ. Частота отказов элементов СВВ зависит от их режима работы, качества и параметров оборудования агрегатов и элементов, их износа, гидрологических особенностей грунтов по трассам трубопроводов и сооружений, их геодезических отметок, климатических особенностей, глубины заложения трубопроводов, а также многих случайных факторов.

Для времени установившейся работы участка СВВ вероятность его безотказной работы может быть представлена зависимостью [10]:

$$r(t) = e^{-\lambda L t}, \qquad (1)$$

где λ – интенсивность отказов в 1/год·км;
L – длина трубопровода;
t – время работы.

Для всей СВВ интенсивность отказов может быть представлена в виде функции или функционала вида [11]:

$$r(t) = F\left(\Phi_i\left(\lambda_i, L_i, D_i\right), \lambda_j, P_j, t\right), \qquad (2)$$

где $\Phi_i(\lambda_i, L_i, D_i)$ – функции вероятности безотказности участков сетей СВВ,
λ_j – интенсивность отказов j-того элемента;
P_j – основной параметр j-того элемента.

Среднее время восстановления отказа определенного вида как продолжительность восстановления элементов СВВ до работоспособного состояния является одним из основных показателей ремонтопригодности:

$$\bar{t}_{\text{в}} = \frac{\sum\limits_{m} t_{\text{в}i}}{m}, \qquad (3)$$

где $t_{\text{в}i}$ – время восстановления i-того элемента;
m – количество отказов i-того элемента.

Данный показатель является важным для обеспечения функционирования СВВ, так как позволяет рассчитать временные, энергетические и трудовые затраты при устранении отказа. Во время восстановления отказа включаются затраты времени на обнаружение, локализацию, восстановление и ввод в нормальную эксплуатацию СВВ.

В СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» для различных категорий надежности систем водоснабжения нормируется время и уровни снижения подачи при устранении отказа. При этом не нормируется количество отказов, их частота за определенный промежуток времени. Также не нормируется продолжительность отказов во времени в течение года, а также относительные затраты на устранение отказов. Поэтому при нормировании вероятностных показателей надежности СВВ необходимо также учитывать показатели ремонтопригодности.

Эффективным методом выявления потенциальных мест отказов в технических системах является локальное диагностирование с делением системы на подсистемы по уровню их надежности [12]. При локальном диагностировании возможна проверка элементов СВВ без их разборки и снятия. При подготовке к проведению локального диагностирования

- определяется перечень элементов системы, которые будут диагностироваться;
- определяется перечень параметров, по которым диагностируются элементы системы;
- устанавливается последовательность диагностирования элементов из перечней;
- разрабатывается методика и выбираются средства диагностирования элементов СВВ.

Перечень агрегатов диагностирования определяется по результатам анализа эксплуатационных отказов и неисправностей СВВ, а также в зависимости от их схем и конструктивных особенностей. Оптимальная последовательность диагностирования элементов СВВ определяется из условия:

$$\overline{T}_1 \cdot P_1 \le \overline{T}_2 \cdot P_2 \le \ldots \le \overline{T}_i \cdot P_i, \qquad (4)$$

где $\overline{T}_i$ – относительная трудоемкость диагностирования элемента;

$\overline{P}_i$ – относительный ресурс агрегата.

Относительная трудоемкость диагностирования *i*-того агрегата определяется по отношению

$$\overline{T}_i = \frac{T_i}{T_{\max}}, \qquad (5)$$

где T_i – трудоемкость диагностирования *i*-того элемента;

$T_{\max}$ – максимальная трудоемкость диагностирования элемента из принятого перечня.

Относительный ресурс *i*-того агрегата определяется по отношению

$$\overline{P}_i = \frac{P_i}{P_{\max}}, \qquad (7)$$

где P_i – γ% ресурс *i*-того элемента;

$P_{\max}$ – максимальный γ% ресурс агрегата из принятого перечня.

Оценка относительной трудоемкости диагностирования определяется для каждой НС в зависимости от доступа к агрегатам, а также видов проверки. Приближенно можно считать, что проверка элементов без разборки трубопроводов – T = 0,1; подключение приборов диагностирования – T = 0,55; проверка с разборкой трубопроводов T = 0,6…1,0.

По результатам диагностирования составляется схема потенциальных отказов СВВ, по которым разрабатываются мероприятия по обеспечению требуемого уровня ремонтопригодности.

Выводы. При проектировании СВВ, а также исследовании их надежности основное внимание уделяется показателям безотказности и долговечности, которые не полностью характеризует надежность восстанавливаемых объектов.

Рассмотрены основные свойства и факторы, влияющие на ремонтопригодность СВВ как одного из основных требований к техническим системам по их приспособленности к техническому обслуживанию и ремонту, осуществляемым с целью поддержания и восстановления долговечности и работоспособности в процессе эксплуатации.

Поддержание ремонтопригодности в процессе эксплуатации СВВ достигается их рациональной системой технического обслуживания и ремонта. Различные мероприятия конструктивного, производственно-технологического и эксплуатационного характера, направленные на уменьшение влияния факторов повреждаемости СВВ, должны быть предусмотрены при проектировании, изготовлении монтаже и в процессе эксплуатации.

Современные методы анализа режимов работы СВВ как управляемых и регулируемых объектов позволяют вплотную подойти к решению в условиях действующих систем задач оптимизации и управления режимами работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Національна доповідь «Про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2010 році» / Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – К., 2011.
2. Асоціація водопровідно-каналізаційного господарства України. Щодо стану та проблем функціонування водопровідно-каналізаційного господарства

України за підсумками роботи у 2006–2007 роках // Вісник Академії будівництва України. – К. : АБУ, 2008. – № 18. – С. 183–189.
3. Николенко И. В. Пути повышения надежности насосных станций систем водоснабжения / И. В. Николенко, С. Д. Бойчук, Е. М. Валкина // Строительство и техногенная безопасность : сб. научных трудов НАПКС. – Симферополь, 2008. – Вып. 26. – С. 98–104.
4. Богдан Н. В. Гидропневмо-автоматика и гидропривод мобильных машин. Эксплуатация и надежность гидропневмосистем / Н. В. Богдан, П. Н. Кишкевич, В. С. Шевченко. – Минск : Ураджай, 2001. – 396 с.
5. Биргер И. А. Техническая диагностика : монография / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 278 с.
6. Салієв Е. І. Реанімація систем водопостачання сільських населених пунктів / Е. І. Салієв // Збірник наукових праць «Будівництво та техногенна безпека» Національної академії природоохоронного та курортного будівництва Міністерства освіти та науки України. – 2007. – Випуск 18. – С. 216–218.
7. Салієв Е. І. Комплексна оцінка системи водопостачання м. Красноперекопськ АР Крим / Е. І. Салієв // Водне господарство України. – 2007. – № 3. – С. 33–38.
8. Салиев Э. И. Модернизация системы водоснабжения на основе комплексной оценки проблемы и средств применимых в ее решении / Э. И. Салиев // ЭСТА. – 2007. – № 6. – С. 26–30.
9. Салієв Е. І. Напрямки вдосконалення систем водопостачання і водовідведення з метою забезпечення раціонального використання природних ресурсів Криму / Е. І. Салієв // 66-а Науково-технічна конференція. – Харків, 2011. – С. 461–470.
10. Абрамов Н. Н. Надежность систем водоснабжения / Н. Н. Абрамов. – М. : Стройиздат, 1979. – 232 с.
11. Чупин Р. В. Развитие теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения / Р. В. Чупин, Е. С. Мелехов. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2011. – 323 с.
12. Николенко И. В. Пути повышения эксплуатационной надежности агрегатов гидропривода / И. В. Николенко // Совершенствование и повышение эффективности использования средств механизации : сб. науч. тр. – Одесса : ОСХИ, 1995. – С. 65–69.

УДК 62.501.12

Стреляная Ю. О., Братан С. М., Новиков П. А.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ЧИСТОВОМ И ТОНКОМ ТОЧЕНИИ НА ТЯЖЕЛЫХ СТАНКАХ

Розглянуті проблеми забезпечення стабільності показників якості поверхні при чистовому і тонкому точінні на важких верстатах.

Ключові слова: *стабільність, чистове і тонке точіння, динамічна система, показники якості, збурення, формуючий фільтр.*

Рассмотрены проблемы обеспечения стабильности показателей качества поверхности при чистовом и тонком точении на тяжелых станках.

Ключевые слова: *стабильность, чистовое и тонкое точение, динамическая система, показатели качества, возмущения, формирующий фильтр.*

The problems of providing of stability of indexes of quality of surface are considered at the clean and thin sharpening on heavy machine-tools.

Key words: *stability, clean and thin sharpening, dynamic system, indexes of quality, indignations, forming a filter.*

Постановка проблемы. Постоянство показателей качества (ПК) является важнейшей характеристикой технологических систем и характеризует стабильность функционирования изготовленной системы. Отсутствие требуемой стабильности изготовления элементов системы является отрицательной характеристикой, которая может проявиться в виде потери системой в целом заданных технических характеристик. Особенно высокие требования к стабильности ПК предъявляются к таким дорогостоящим деталям машин, как валки прокатных станов, роторы турбин, корабельные гребные валы и т. п.

Жесткие требования к изготовлению указанных деталей обусловлены их служебным назначением [1]. Например, при производстве оборудования для прокатных станов каждая клеть может иметь после сборки различную точность, что обусловлено погрешностями изготовления каждой из ее деталей.

Для изготовления вышеуказанных деталей в качестве финишной операции часто применяют чистовое и тонкое точение, в процессе которого формируется окончательное качество изделия, непосредственно влияющее на качество оборудования в целом. Технологический процесс чис-

тового и тонкого точения является сложным многокомпонентным объектом, на который оказывает влияние большое количество изменяющихся входных, управляющих и возмущающих воздействий.

Анализ литературы. Отечественной и мировой наукой в настоящее время накоплен значительный объем теоретической и экспериментальной информации о физических процессах и явлениях, протекающих при формообразовании поверхностей [2; 3]; сформулированы принципы технологической наследственности, изучено влияние на параметры качества способов обработки, геометрии и материалов режущих инструментов, режимов резания, смазочно-охлаждающих жидкостей и других технологических факторов [1]; исследованы физико-механические и химические явления процессов резания и износа инструмента, созданы новые эффективные инструментальные материалы, станки и способы обработки [1].

Принимая во внимание многогранность выполненных исследований, в то же время следует отметить, что до сих пор недостаточно изучен механизм формообразования поверхностей при чистовом и тонком точении на тяжелых станках. Кроме того, стремление интенсифицировать процесс обработки заготовок на этих операциях приводит к снижению ПК и потере их стабильности вследствие влияния неучтенных переменных технологических факторов производства.

Цель работы – разработка концепции обеспечения стабильности показателей качества поверхностей при чистовом и тонком точении на тяжелых станках.

Изложение основного материала. Согласно общепринятым представлениям, например [2], под стабильностью понимают свойство технологического процесса сохранять показатели качества изготовления продукции в заданных пределах в течение некоторого промежуточного времени.

Необходимо рассмотреть технологический процесс чистового и тонкого точения на тяжелых станках как динамическую систему. Согласно общепринятой методике анализа технических систем можно провести декомпозицию технологического процесса на несколько частей:

- измеряемую и управляемую часть – вектор управления $U(\tau)$;
- измеряемую, но неуправляемую часть – вектор входных переменных $X(\tau)$;
- неизмеряемую и, тем более, неуправляемую часть – вектор $\Omega(\tau)$.

Внутри каждого из указанных векторов можно выделить компоненты, характеризующие факторы, воздействующие на технологический процесс (рис. 1).

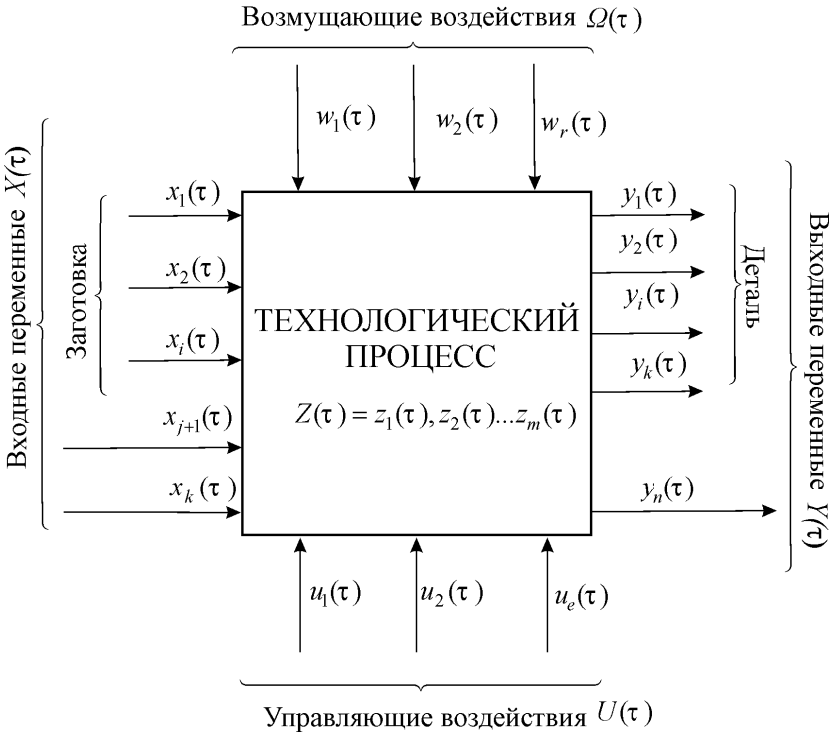

Рис. 1. Технологическая операция.

Состояние технологического процесса отображается вектором $Z(\tau)$. При этом доступная измерению часть $Z(\tau)$ является вектором выходных переменных $Y(\tau)$.

Часть выходных переменных $Y(\tau)$ определяет единичные показатели качества $y_k(\tau)$, по которым целесообразно вести оценку стабильности технологического процесса.

Следовательно,

$$\left|y_k(\tau_0) - y_k(\tau)\right| \le \varepsilon_k \text{ при } \tau \in (\tau_0, \tau_f), \qquad (1)$$

где ε_k – заданный предел изменения k-го показателя качества;

(τ_0, τ_f) – заданный интервал времени, в течение которого должны сохраняться показатели качества; эти показатели должны находиться в пределах заданного поля допуска

$$y_{k\min} \le y_k(\tau) \le y_{k\max}.$$

Неравенство (1) гарантированно выполняется при условии

$$\left|\frac{dy_k}{d\tau}\right| \le \delta_k, \qquad (2)$$

где $\delta_k = \dfrac{\varepsilon_k}{\tau_f - \tau_0}$ – ограничение по скорости изменения параметра y_k.

Причинами, вызывающими изменение y_k, являются внешние воздействия на технологический процесс, т. е. векторы воздействий $U(\tau)$; $X(\tau)$, $\Omega(\tau)$, и начальные условия состояния $Z(\tau_0)$. В силу того, что $\Omega(\tau)$ является неизмеряемым, то его компоненты могут считаться случайными функциями, результат воздействия которых приводит к случайным отклонениям от номинальных значений y_k и, следовательно, появлению элементов случайности в показателях качества.

В соответствии с ГОСТ 15895-77, для такого случая критерием стабильности служит среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра σ_{y_k}, т. е.

$$\sigma_{y_k} \le \sigma_{y_{k\max}}. \qquad (3)$$

Обеспечение стабильности соответствующих показателей производится за счет выбора компонент вектора $U(\tau)$, что следует из формулы (1).

Считается, что рациональными являются такие параметры управления $U(\tau)$, которые обеспечивают положение центра рассеивания y_k внутри поля допуска ($y_{k\min}$, $y_{k\max}$) на таком уровне y_{k0} (рис. 2), который минимизирует вероятность появления бракованных деталей. Обычно указанную задачу решают путем соответствующей фиксированной настройки станка $U_0^*(\tau_0)$, обеспечивавшей заданные параметры в течение максимально достижимого интервала времени.

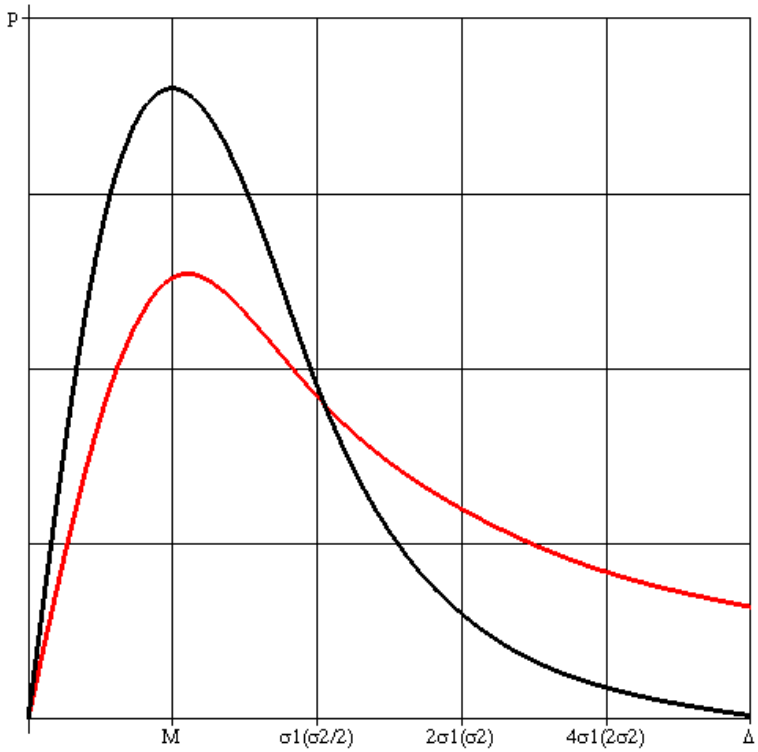

Рис. 2. Изменение положение центра рассеяния внутри поля допуска при различных параметрах настройки.

Наличие существенных колебаний в отклонениях расположения и шероховатости поверхности можно объяснить наличием в технологических процессах существенных возмущающих воздействий $\Omega(\tau)$, вызванных нестабильностью технологического процесса, в том числе и за счет того, что часть доступных измерению параметров $X(\tau)$ считается равной $X(\tau_0)$, и не выполняются условия (2). Фактически при обработке каждой новой заготовки параметры процесса $Z(\tau)$ принимают новые значения. Это соответствует смещению центра рассеивания относительно поля допуска и выходит за рамки ограничения (1).

Указанный недостаток может быть устранен путем уменьшения интервала (τ_0, τ_f) задания $U_0^*(\tau_0)$, т. е. более частой настройкой параметров

технологического процесса и представляет алгоритм управления технологического процесса с периодическим восстановлением параметров. Например, после обработки определенного количества заготовок производят замену режущего инструмента.

Также возможно обеспечить стабильность по некоторым заданным параметрам y_i ($z_i(\tau)$ = const) выбором $U_1^*(\tau_0)$ за счет более быстрого изменения «маловлиятельных» состояний $z_j(\tau)$ = var. Например, при токарной обработке считаются целесообразными такие $U_1^*(\tau_0)$, которые скомпенсируют износ инструмента. Недостатком рассмотренного является повышенная скорость изменения «маловлиятельного» состояния $z_j(\tau)$, которая может привести к выходу из поля допусков других показателей качества y_j и, в соответствии с (2), – снижению и потере стабильности по этим факторам. При определении необходимых параметров $U_1^*(\tau_0)$ для таких методов обеспечения стабильности качества обычно достаточно поведенческого описания технологического процесса.

Все вышеперечисленные алгоритмы не обеспечивают одновременную стабилизацию параметров качества в условиях случайных возмущений $\Omega(\tau)$, что недопустимо для финишных операций, для которых допуски ε_k являются малыми величинами.

На операциях чистового и тонкого точения обработка заготовок также выполняется в условиях непостоянства параметров технологической системы обработки и окружающей среды. Изменяется состояние рабочей поверхности резца, состав и свойства СОТС, параметры жесткости технологической системы, температура окружающей среды и т. д. Изменение одних параметров протекает за период обработки одной детали, других – в течение смены, третьих – в течение более длительного периода.

Для таких условий $Z(\tau)$ = var, вектор управления $U^*(\tau)$ должен выбираться с учетом изменения $Z(\tau)$, и для каждой детали m необходимо подбирать новое управление $U_m^*(\tau)$.

Применение традиционных методов и средств для обеспечения стабильности заданных параметров качества поверхностей при чистовом и тонком точении на тяжелых станках практически исчерпало свои возможности и требует детализированного изучения этих технологических операций как системы, отражающей взаимодействие состояний $Z(\tau)$.

Задачу по обеспечению стабильности заданных параметров качества поверхностей при чистовом и тонком точении на тяжелых станках можно решить, применив подход, основанный на использовании схем со «стохастическим наблюдателем» [4], где оценка неизмеряемых компонент производится по результатам моделирования динамики технологической системы с входным сигналом, соответствующим сигналу управления, поступающему на реальный динамический объект – технологическую систему. Для учета влияния статистических свойств текущих отклонений необходимо дополнительно к входному сигналу подавать на вход модели системы случайный процесс с такими же стохастическими характеристиками, как у текущего отклонения формы заготовки и размеров инструмента. Соответствующий случайный входной сигнал может быть получен при помощи формирующего фильтра [5].

С течением времени значения переменных и их оценок наблюдателем неизбежно расходятся вследствие, например, отличий действительных значений отклонений форм заготовки и размеров инструмента и их моделей. Целесообразно использование блока подстройки состояний наблюдателя в виде стохастического наблюдателя, который осуществляет необходимую коррекцию входных сигналов, обеспечивая минимально возможное значение среднеквадратического отклонения [5].

Полученные оценки имеют наименьшую дисперсию из возможных (при условии гауссовских шумов измерений) и пригодны для использования в системах управления по отклонению. Такая система должна стабилизировать режимы относительно режимов, задаваемых условиями управляющей программы.

Таким образом, для обеспечения стабильности показателей качества обработки деталей при чистовом и тонком точении на тяжелых станках необходимо создать АСУ ТП:

- на основе изучения процессов, происходящих в технологической системе при взаимодействии детали и инструмента, разработать модель динамического объекта, характеризующую отклонения от статического режима;
- для учета статистических свойств текущих отклонений формы детали и размеров инструмента необходимо построить стохастическую динамическую модель (формирующий фильтр) профиля поверхности детали при ее взаимодействии с инструментом, учитывающую влияние вариации формы и ее спектральный состав;
- на основе разработанных моделей построить динамические оценки текущих параметров технологической системы;
- использовать полученные оценки текущих параметров при построении АСУ ТП для стабилизации параметров технологического процесса чистового и тонкого точения в реальном масштабе времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории резания материалов : учебник [для высших учебных заведений] / Н. П. Мазур [и др.] ; под общей редакцией Н. П. Мазура. – Львов : Новый свет-2000, 2010. – 422 с.
2. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – М. : Машиностроение, 1979. – 176 с.
3. Братан С. М. Теорія різання. Практикум : навч. посібник / С. М. Братан, П. А. Новіков, Д. Є. Сидоров ; [під загальною редакцією С. М. Братана]. – Севастополь : Вид-во СевНТУ, 2012. – 248 с.
4. Братан С. М. Обеспечение качества и повышение стабильности обработки при чистовом и тонком шлифовании. Часть 1 / С. М. Братан // Резание и инструмент в технологических системах. – Меж. науч.-тех. сб. – Харьков : ХГПУ, 2005. – Вып. 68. – С. 34–39.
5. Калман Р. Очерки по математической теории систем / Р. Калман, П. Фалб, М. Арбиб. – М. : Мир, 1971. – 398 с.

УДК 621.793.7

Лузан С. А., Горбачевская О. М.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Проведено аналіз деталей, що працюють в умовах тертя і потребують відновлення зношених поверхонь. Обґрунтовано вибір газополум'яного напилення як методу відновлення при ремонті деталей машин.

Ключові слова: *деталь, зносостійкість, якість поверхні, покриття, газотермічне напилення.*

Проведен анализ деталей, работающих в условиях трения и требующих восстановления изношенных поверхностей. Обоснован выбор газопламенного напыления в качестве метода восстановления при ремонте деталей машин.

Ключевые слова: *деталь, износостойкость, качество поверхности, покрытие, газотермическое напыление.*

The analysis of details working in friction conditions and requiring restoring threadbare surfaces is carried out. The choice of the flame spraying as a method of restoring at repair of machines parts is proved.

Key words: *detail, wear resistance, surface quality, coating, thermal spraying.*

Постановка проблемы. В настоящее время ни одно изделие, тем более средство транспортной техники, не может обойтись без ремонта и технического обслуживания, целью которого является обеспечение в течение всего периода эксплуатации требуемого уровня безотказности при наименьших затратах времени и средств. Потеря машиной работоспособности в процессе эксплуатации – неотвратимый процесс, протекающий в зависимости от условий ее использования с большей или меньшей интенсивностью.

Известно, что 80...85% машин выходит из строя по причине отказа работы узлов трения в результате износа поверхностей трения или поломки, вызванной им, и только 15...20% – по другим причинам [1; 2]. Поэтому проблема повышения износостойкости восстановленных деталей в процессе ремонта деталей, работающих в условиях трения, является актуальной.

Цель статьи – провести анализ научно-технической информации по оценке ресурса деталей средств транспорта, технологических возможностей газотермических методов нанесения покрытий, определить наиболее оптимальный и направление его совершенствования для повышения качества восстановленных поверхностей деталей, в том числе повышения износостойкости.

Изложение основного материала. Все разновидности проявления процессов трения и износа при фрикционном взаимодействии твёрдых тел подразделяются на две группы: допустимые (износ) и недопустимые (повреждаемость) [3]. К допустимым относятся различные виды механохимического износа, связанные с образованием в процессе трения тончайших поверхностных плёнок, вторичных структур за счёт взаимодействия материала контактирующих тел с активными компонентами газовых и жидких сред. К недопустимым – схватывание 1 и 2 рода, механическая форма абразивного износа с повреждением поверхности контакта, царапаньем и снятием микростружки, фреттинг-процесс и др.

В основу указанной классификации положен процесс выявления определяющего износа, который наряду с сопутствующими является ведущим. Известно, что в зависимости от факторов механических воздействий, среды и материала на поверхности трения возникают различные механические, механохимические и теплофизические процессы [3–6].

Основные факторы, определяющие развитие процессов при внешнем трении, можно разделить на три группы:

- внешние механические воздействия;
- среда (твердая, жидкая, газообразная);
- материалы, их состав, структура и свойства.

К факторам основной группы механических воздействий относятся род трения, скорость относительного перемещения трущихся поверхностей, нагрузка и характер ее приложения, а также производный от них фактор – температура поверхности трения.

Анализ причин, вызывающих основные процессы на поверхностях трения, а также факторов, влияющих на их развитие в процессе изнашивания, указывает на их прямую связь с факторами механического воздействия. При изменении внешних механических воздействий на поверхностях трения возникают различные процессы, для которых характерно чередование явлений схватывания, окисления, усталости металлов, абразивного действия продуктов износа. Среда существенно влияет на напряженное состояние в зоне контакта и придает ряд особенностей всем процессам поверхностного разрушения при трении. Природа материалов непосредственно влияет на развитие или торможение этих процессов [7].

При нормальных условиях эксплуатации, ввиду отсутствия абразива и жидкостей, молекулярно-механический износ деталей неизбежен и протекает в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1.

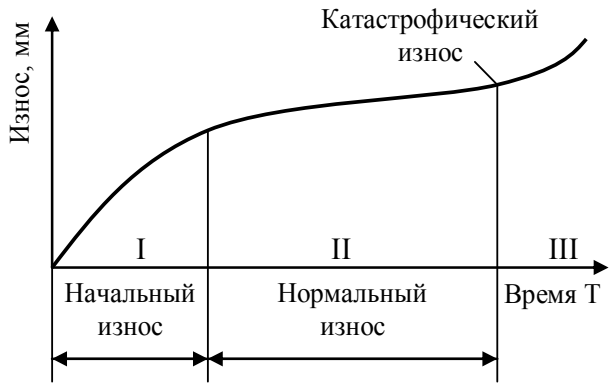

Рис. 1. Общая схема износа во времени.

Механизм молекулярно-механического износа рассматривается в работах И. В. Крагельского [8; 9], сила трения представляется как сумма сопротивлений, возникающих в результате молекулярного и механического взаимодействия. Причем нормальный износ обеспечивается при условии реализации процесса нормального внешнего трения, при котором разрушение не затрагивает слой основного материала, а происходит в пределах «третьего тела».

Применяя энергетический подход к проблеме износа деталей, можно прогнозировать остаточный ресурс и величину работы трения, затрачиваемую на износ определенного количества материала. Другими словами, управлять качеством поверхностей при восстановлении деталей необходимо с учетом обеспечения процесса нормального внешнего трения (участок 1–3 на рис. 2, $\Delta E/A$ = min) при эксплуатации деталей машин, что обеспечит максимальный срок службы изделия.

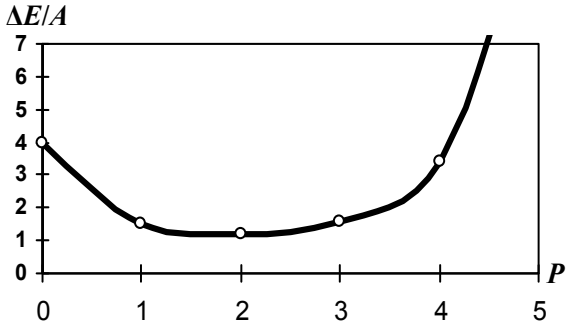

Рис. 2. Энергетическое соотношение $\Delta E/A$ для разных областей трения:
A – работа внешнего трения,
ΔE – общее увеличение теплосодержания узла трения;
0–1 – участок переходной области малых значений P и v;
1–3 – участок нормального внешнего трения;
3–4 – участок нарушения динамического равновесия;
4–5 – участок развития патологических процессов.

Участок 1–3 представляет наиболее общую и важную область – нормальное внешнее трение. Интенсивность процесса трансформации и разрушения поверхностей контакта минимальна. Такой режим трения обеспечивается протеканием на границе раздела и в тончайших поверхностных слоях строго определенных механо-физико-химических процессов. Пластическая деформация принимает форму поверхностного текстурирования. Отношение $\Delta E/A$ постоянно и минимально, и зависит от свойств трущихся материалов и условий внешнего трения:

$$\frac{\Delta E}{A} = \left(P, v, \overline{C}\right), \qquad (1)$$

где P – давление;
v – скорость скольжения;
$\overline{C}$ – вектор параметров трения – свойств материалов, среды, температуры и т. п.

Поглощенная энергия ΔE затрачивается на текстурирование и активизацию поверхностных слоев металла. Равновесное состояние активизированных слоев достигается за счет их насыщения активным веществом, имеющимся в зоне трения, и теплообмена.

Основная часть работы сил трения в этой области превращается в теплоту:

$$A \cong Q\,. \qquad (2)$$

Для этой области соблюдаются линейные зависимости коэффициента трения от нагрузки. Существенные изменения состояния поверхностного слоя, природы контакта и вида связей не наблюдаются.

Дальнейшее повышение давления (участок 3–5) вызывает нарушение стабильности характеристик процессов трения и возникновение критических режимов трения и повреждаемости поверхностей контакта (схватывание, смятие, внедрение, пропахивание), что недопустимо в эксплуатации.

С целью повышения износостойкости деталей применяются разнообразные методы восстановления и упрочнения поверхностей трения: термообработка, различные виды химико-термической обработки, пластическое деформирование, напыление износостойких покрытий, наплавка легированным элементом, различные электрофизические методы и др.

Указанные методы позволяют упрочнять поверхностный слой деталей, работающих в условиях трения, а в сочетании с чистовой обработкой упрочненных поверхностей – повышать его износостойкость.

Одним из интенсивно развивающихся направлений является газотермическое напыление покрытий: газопламенное, плазменное, денатационное, электродуговая металлизация [10–12]. Доля деталей, восстанавливаемых на предприятиях агропромышленного комплекса методами наплавки, составляет 34,4%, способами газотермического напыления – 26,1%, электрохимическими покрытиями – 20,4%, другими наиболее часто применяемыми методами – 19,1% [13].

Способы газотермического напыления (ГТН) занимают 2 место по объёму восстанавливаемых деталей, при этом основная доля деталей, восстанавливаемых газотермическими покрытиями (94%), приходится на газопламенное напыление (ГПН).

Результаты анализа, выполненного консалтинговой фирмой The Technical Center for Mechanical Engineers (Франция), показывают, что мировой объём рынка технологий ГТН в 2000 г. составил 1600 млн. евро [14], что подтверждает перспективность данного направления.

В табл. 1 приведены характеристики и основные параметры методов газотермического напыления [15–19].

Таблица 1.

Характеристика и основные параметры методов газотермического напыления.

Параметр	Способ напыления			
	Газопламенный	**Плазменный**	**Детонационный**	**Электродуговая металлизация**
Производительность процесса, кг/ч	8...10 (самофлюсующихся сплавов)	3...50	0,1...6,0	12..14
Стоимость 1 ч работы установки, у. е.	2,60	9,06	8,71	4,24
Коэффициент использования напыляемого материала	0,8–0,95	0,7–0,9	0,3–0,8	0,8–0,95
Площадь покрытия образца, напыленного за 1 ч работы, $м^2$	0,45–1,00	0,20–0,50	0,10–0,30	6,00–8,00
Температура частиц материала, К	до 2000	до 3000	до 3000	до 2000
Скорость частиц материала, м/с	20–80	50–200	600–1000	50–240
Толщина покрытия, мм	0,1...2,5	0,1...50	0,05...0,5	0,5...2,5
Прочность сцепления $\sigma_{сц}$, МПа	10...20	10...50	75…150	5...15
Пористость, %	16,0...35,0	2,0...15,0	0,5...1,0	10,0…30,0
Вид покрытия*	1, 2	2, 3, 4	3, 4, 5	1, 2, 3
Недостатки	1. Невозможность напыления тугоплавких материалов. 2. Низкая прочность сцепления покрытия и основы.	1. Шум. 2. Интенсивное ультрафиолетовое излучение. 3. Высокая стоимость оборудования. 4. Большие эксплуатационные затраты.	1. Может возникнуть остаточная деформация от действия импульсной волны. 2. Большой (до 140 ДБ) шум. 3. Высокая стоимость оборудования.	1. Опасность перегрева и окисления напыляемого материала при малых скоростях подачи проволоки. 2. Значительное выгорание легирующих элементов, входящих в напыляемый сплав.

*1 – антифрикционные для работы в условиях смазки; 2 – уплотнительные; 3 – износостойкие при высокотемпературном сухом трении; 4 – теплоизоляционные; 5 – износостойкие при особо жестких условиях эксплуатации покрытий.

Применению методов ГТН в машиностроении посвящены работы Дорожкина, Сонина, Сидорова и др. [10–12]. Многие отмечают преимущества плазменного напыления, но при этом и его высокую себестоимость. Наиболее распространенными способами восстановления изношенных деталей машин в практике ремонтного производства являются электродуговая наплавка и газопламенное напыление металла в силу своей высокой производительности и технологичности процесса.

Для обоснования способов восстановления деталей и определения их предельных износов их подразделяют на классы, как правило, исходя из двух факторов: подобия их формы и сходства технологических процессов их изготовления, причем второй фактор является определяющим. Классы предусмотрены следующие: I – корпусные детали; II – круглые стержни (валы); III – полые цилиндры (втулки); IV – диски; V – некруглые стержни (рычаги); VI – крепежные детали [20].

Все дефекты деталей автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин разбиты на 14 групп по видам изнашивающихся поверхностей: износ цилиндрической наружной поверхности; износ конической и сферической поверхностей; износ шлицев; износ пазов, канавок, лысок; износ, повреждение резьбы; износ отверстий; износ и коробление плоской поверхности; износ профильной и фасонной поверхности; износ зубьев цилиндрических шестерен; износ зубьев конических шестерен; износ поверхности червяка; трещины, изломы; скручивание; изгиб [20; 21].

По данным исследований Е. Л. Воловика [22], износы различных конструктивно-подобных групп деталей машин колеблются от 0,01 до 10 мм. Наибольшее число деталей (около 83%) имеет износ до 0,6 мм. С точки зрения экономии расходных материалов наиболее целесообразно применение газопламенного напыления, которое позволяет получать покрытия толщиной от 0,3 до 10 мм. К преимуществам данного метода ГТН можно отнести высокую производительность процесса напыления, относительно низкое тепловое воздействие на основу, гибкость технологического процесса, дешевизну и мобильность оборудования, относительно низкий уровень шума. Специалисты фирмы «Metco» считают газопламенное напыление очень перспективным методом упрочнения и восстановления деталей, который позволяет продлить срок их службы в 2–20 раз (в зависимости от назначения детали) [23].

Применяя тот или иной способ восстановления деталей, следует учитывать, что проблема повышения послеремонтного ресурса машин предъявляет повышенные требования к технологии восстановления деталей и обеспечению их высокого качества, в частности износостойкости.

Для того чтобы деталь после восстановления удовлетворяла условию надежности и долговечности, необходимо обеспечить повышенную износостойкость поверхностей трения. Тем более что для современного ремонтного производства технология восстановления деталей должна базироваться на применении таких способов и средств нанесения покрытий, упрочнения и механической обработки, которые наряду с высокой производительностью позволяют не только сохранить, но и существенно увеличить долговечность восстанавливаемых деталей по сравнению с новыми.

Таким требованиям отвечает метод газопламенного напыления, который выгодно отличается от других методов газотермического напыления дешевизной применяемого оборудования, его компактностью и мобильностью, возможностью выполнять работы по восстановлению деталей непосредственно у заказчика. Однако, учитывая недостаточно высокую прочность сцепления покрытия с основой, метод нуждается в совершенствовании. Такую задачу можно успешно решить путем интегрирования газопламенного напыления с другими технологиями.

Выводы.

1. Комплексная оценка деталей машин, поступающих на ремонт, показала, что 80% деталей выходят из строя по причине износа рабочих поверхностей, причем 83% из них имеют износ до 0,6 мм.

2. В общем объёме деталей, восстанавливаемых на предприятиях агропромышленного комплекса, второе место занимают способы газотермического напыления покрытий, причём доля деталей, восстанавливаемых газопламенным напылением, составляет 94%.

3. Газопламенное напыление является наиболее оптимальным методом для восстановления изношенных поверхностей деталей в силу своей экономичности, высокой производительности процесса, гибкости технологического процесса и обеспечения нанесения восстановительного покрытия требуемой толщины. Однако метод требует совершенствования с целью повышения качества напыляемых покрытий, в частности прочности сцепления с основой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хебды М. Теоретические основы : справочник по триботехнике в трех томах / М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 1. – 400 с.
2. Проников А. С. Надежность машин / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 591 с.

3. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / [под ред. Б. И. Костецкого]. – К. : Техника, 1976. – 292 с.
4. Исследование процессов деформации металлов и сплавов при внешнем трении / [Б. И. Костецкий, А. К. Караулов, А. И. Бармашенко и др.] // Тезисы докладов седьмой Всесоюзной конференции по физике прочности и пластичности металлов и сплавов. – Куйбышев : Изд-во Куйбышевского политехнич. института, 1973. – С. 12–24.
5. Крагельский И. В. Основы расчета на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин. – М. : Машиностроение, 1977. – 123 с.
6. Цеснек Л. С. Механика и микрофизика истирания поверхностей / Л. С. Цеснек. – М. : Машиностроение, 1979. – 263 с.
7. Матвеев Ю. И. Повышение долговечности деталей судовых дизелей с использованием плазменного напыления и лазерной обработки : дис. … докт. техн. наук : спец. 05.08.04 / Ю. И. Матвеев. – Новгород, 2003. – 301 с.
8. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
9. Крагельский И. В. Фрикционное взаимодействие твердых тел / И. В. Крагельский // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 1. – С. 12–29.
10. Дорожкин Н. Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками / Н. Н. Дорожкин. – Минск : Наука и техника, 1988. – 143 с.
11. Сонин В. И. Газотермическое напыление материалов в машиностроении / В. И. Сонин. – М. : Машиностроение, 1973. – 152 с.
12. Сидоров А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. – М. : Машиностроение, 1987. – 192 с.
13. Науменко А. А. Повышение долговечности деталей машин нанесением покрытий водородно-кислородным пламенем : дис. … канд. техн. наук : спец. 05.02.01 / А. А. Науменко ; Харьковский государственный технический университет сельского хозяйства. – Харьков, 2004. – 196 с.
14. Карпеченко И. Восстановление изношенных деталей методами газотермического напыления / И. Карпеченко и др. // MOTROL. – 2009. – Вып. 10. – С. 264–267.
15. Хасуй А. Наплавка и напыление / А. Хасуй, О. Моригаки. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.
16. Порошковая металлургия и напыление покрытия : учебник для вузов / [В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др.]. – М. : Металлургия, 1987. – 792 с.
17. Донской А. В. Электронно-плазменные процессы и установки в машиностроении / А. В. Донской, В. С. Клубникин. – М. : Машиностроение, 1979. – 221 с.
18. Петров С. В. Повышение качества плазменных покрытий. / С. В. Петров // Сварочное производство. – 2005. – № 5. – С. 48–50.
19. Теория и практика газопламенного напыления / [П. А. Витязь, В. С. Ивашко, Е. Д. Манойло и др.]. – Минск : Навука и техника, 1993. – 295 с.
20. Масино М. А. Организация восстановления автомобильных деталей / М. А. Масино. – М. : Транспорт, 1981. – 176 с.
21. Шашкин В. В. Надежность в машиностроении : справочник / В. В. Шашкин, Г. П. Карзов. – СПб. : Политехника, 1992. – 719 с.
22. Воловик Е. Л. Справочник по восстановлению деталей / Е. Л. Воловик. – М. : Колос, 1981. – 351 с.
23. Хасуй А. Техника напыления / А. Хасуй ; [пер. с япон.] – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.

УДК 531.789.1

Хабрат Н. И., Умеров Э. Д., Абдулгазис А. У.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ, ИСПЫТАНИЕ И РАСЧЕТ РОТАЦИОННОГО ДИНАМОМЕТРА ДЛЯ ПРИВОДОВ МАШИН С АВТОМАТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Наведено опис конструкції і розрахунок основних елементів вимірника крутного моменту середньої величини з використанням клинопасової передачі в якості демпфера вимірюваної навантаження.

Ключові слова: *ротаційний динамометр, крутний момент, демпфер, механічні передачі.*

Приведено описание конструкции и расчет основных элементов измерителя крутящего момента средней величины с использованием клиноременной передачи в качестве демпфера измеряемой нагрузки.

Ключевые слова: *ротационный динамометр, крутящий момент, демпфер, механические передачи.*

A description of the design and calculation of the basic elements of torque meter using the average as measured damper load belt transmission.

Key words: *rotary dynamometer, torque, damper, mechanical transmission.*

Постановка проблемы. Для выполнения различного рода технологических процессов машинами на их привод подводится механическая энергия. При этом нагрузки при выполнении технологического процесса изменяются по различным случайным законам. Для автоматизации технологических процессов выполняемых машинами необходимо рационально иметь в качестве сигнала обратной связи постоянный параметр – среднюю величину крутящего момента.

Это условие позволяет проводить автоматизацию приводов машин и тем самым, высвобождая людей повысить производство труда, облегчить работу обслуживающего персонала особенно при выполнении технологических операций в условиях опасных для пребывания человека.

Анализ литературы. В работе [1] отмечается, что для оптимизации технологических процессов, выполняемых машиной, в качестве сигнала обратной связи наиболее рационально использовать величину среднего крутящего момента на привод машин. Известны для этих целей различного рода измерители крутящего момента средней величины [1], у которых механическая передача посредством упругого элемента (пружины) соединяется с валом, и по величине угла закручивания упругого элемента определяется средняя величина крутящего момента как полусумма его максимальной и минимальной величин.

На рис. 1 приведены различные законы изменения крутящего момента за один оборот вала. Из анализа этого графика следует, что средняя величина крутящего момента как полусумма его экстремальных значений будет правильно определена для закона *b*. Для закона *a* она будет завышена, для закона *c* занижена.

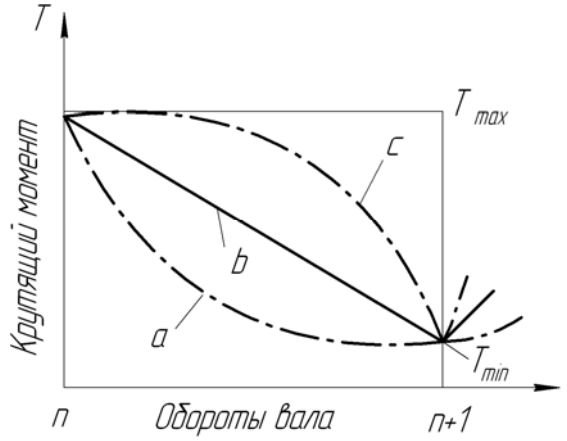

Рис. 1. Различные законы изменения крутящего момента за один оборот вала.

В научно-исследовательских работах задача измерения крутящего момента средней величины успешно решается с использованием электронных измерительных устройств [2]. Использование же таких измерителей в производственных условиях затруднено.

Цель данной **работы** – разработка конструкции и расчет основных элементов измерителя крутящего момента средней величины для приводов машин с автоматическим управлением, работающих в производственных условиях.

Изложение основного материала. Поставленная задача измерения крутящего момента на примере цепного привода решается следующим образом [3]. На приводном валу 1 (рис. 2) подвижно в тангенциальном направлении устанавливается, например, ведомая звездочка 10 на ступицу 11, которая кинематически соединяется с одной стороны с валом посредством пружины кручения 9, с другой стороны с полушкивом (конусным диском) 12 клинового приводного ремня 13, поджимаемого вторым полушкивом (конусным диском) 14, кинематически жестко соединенным с валом 1. При этом натяжение клинового ремня 13, находящемуся между полушкивами (конусными дисками) 12 и 14, создается натяжным шкивом 15. Звездочка 10 трубой 8 соединена с диском 7. На валу 1 закреплен кронштейн 4 щеткодержателя, щетки 5 которого контактируют с круговой реохордой 6 на диске 7.

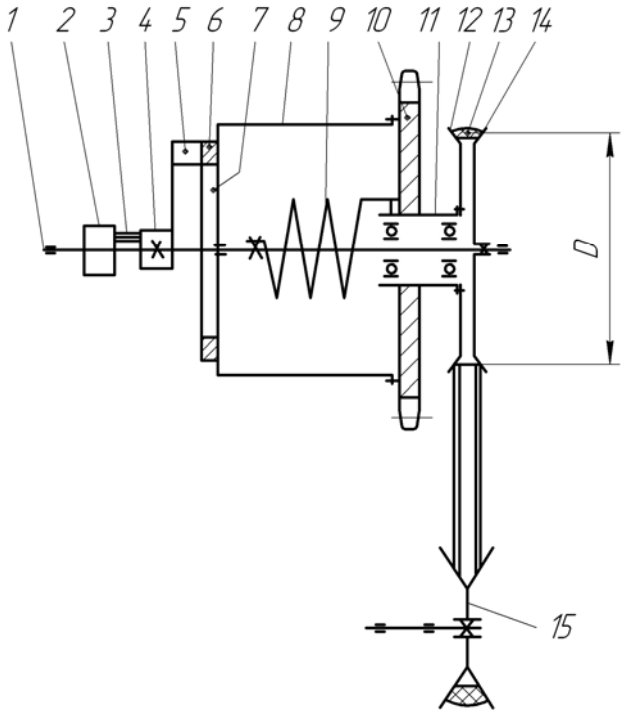

Рис. 2. Схема измерителя крутящего момента средней величины на ведомой звездочке цепной передачи.

Работает измеритель крутящего момента средней величины следующим образом. При первоначальном нагружении на вал 1 нагрузка передается на звездочку 10 через клиновой ремень 13 за счет сил трения по боковым поверхностям конусных дисков 12 и 14, что приводит к поперечному сдвигу ремня 13 в нормальном сечении (рис. 3, *а*) и закручиванию пружины 9 до тех пор, пока вся нагрузка не будет передаваться полностью этой пружиной (рис. 3, *б*).

При уменьшении передаваемой нагрузки звездочкой 10 пружина 9, раскручиваясь, создает сдвиг в нормальном сечении ремня (рис. 3, *в*) в обратном направлении до тех пор, пока ее нагруженность не будет соответствовать передаваемой нагрузке звездочкой на вал. Так как ин-

тенсивность деформации сдвига ремня в нормальном сечении значительно отстает от интенсивности изменения передаваемой нагрузки, то пружина закручивается на такой угол, которым и определяется средняя величина передаваемой нагрузки приводом машины, работающей в установившемся режиме. Величина закручивания пружины при этом регистрируется электроизмерительной аппаратурой по величине разбаланса моста Кристи [4], два плеча которого составляют круговую реохорду 6 на диске 7. Величина разбаланса моста передается на электроизмерительную аппаратуру через токосъемник 2 и электропроводку 3.

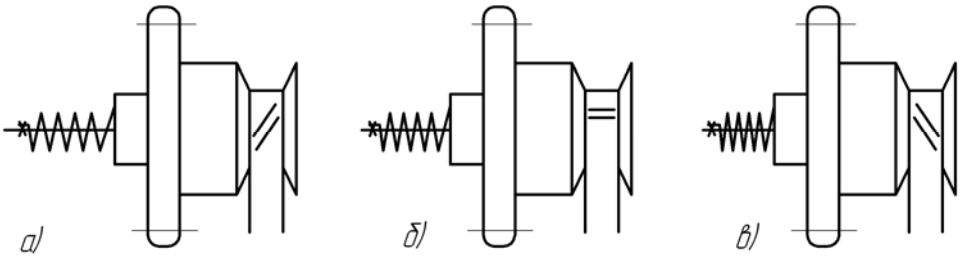

Рис. 3. Режимы работы измерителя крутящего момента средней величины с демпфером при: *а* – увеличивающейся нагрузке; *б* – постоянной нагрузке; *в* – уменьшающейся нагрузке.

Информация о величине передаваемого крутящего момента средней величины может быть получена и механическим путем, например, установкой на валу 1 и трубе 8 зубчатых колес, кинематически связанных с дифференциальным механизмом, выдающим показания о передаваемой нагрузке в угловом измерении.

При установке на валу 1 подвижно в осевом и неподвижно в тангенциальном направлениях полого винта, кинематически соединенного с гайкой на трубе 8, получим сигнал об измеряемом параметре в линейном измерении по величине перемещения полого винта.

С использованием стробоскопа появляется возможность непосредственно визуально наблюдать за величиной измеряемого параметра по углу закручивания пружины друг относительно друга конусных дисков 12 и 14. При этом на конусном диске 14 должна быть нанесена угловая шкала, а на конусном диске 12 радиальная метка.

Снятие (получение) информации о величине передаваемого крутящего момента средней величины возможно и многими другими способами: индуктивным, емкостным и т. д.

Рассмотрим вопрос расчета основных элементов конструкции данного измерителя крутящего момента средней величины. Для этого необходимо знание закона изменения нагрузки на привод машин в установившемся режиме ее работы.

На рис. 4 приведен закон изменения нагрузок на привод машины $T = T(\omega)$ и его номинальная величина $T_c = T_c(\omega)$. На этом графике представлена величина максимального отклонения крутящего момента ΔT от его средней (номинальной) величины.

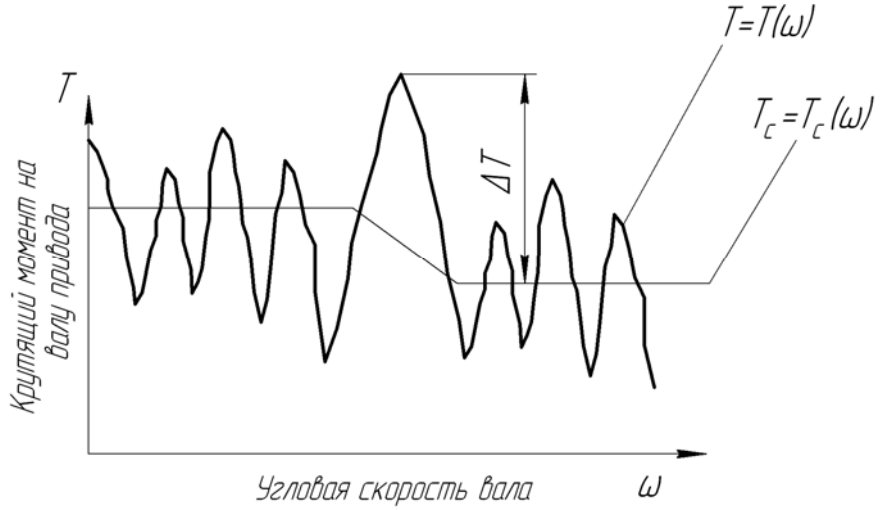

Рис. 4. Характер изменения нагрузки на привод машин.

Из рассмотрения принципа работы демпферного устройства измерителя крутящего момента следует, что ремень 13 (рис. 2), охватывающий конусные диски 12 и 14 по расчетному радиусу 0,5D и углу обхвата α, в момент отклонения крутящего момента от его средней величины на ΔT будет нагружаться по его рабочим боковым поверхностям конусных дисков силой

трения F_t, создавая момент трения на конусном диске 14 равным T_t и противоположно ему направленным.

Запишем это условие в математическом виде:

$$\Delta T = T_t = 0{,}5DF_t = 0{,}5F_nDf, \qquad (1)$$

где F_n – сила нормального давления на боковую поверхность каждого из конусных дисков (см. рис. 5);

f – коэффициент трения клинового ремня по поверхности конусных дисков.

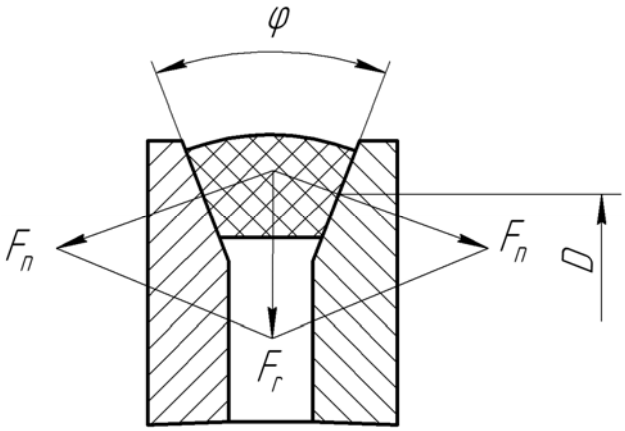

Рис. 5. Схема сил, воздействующих на конусные диски.

Из схемы силового нагружения конусных дисков находим F_n:

$$F_n = F_r / 2\sin(\varphi/2), \qquad (2)$$

где F_r – радиальное давление, создаваемое ремнем на конусные диски по его углу обхвата α;

φ – угол желоба для клинового ремня, создаваемый конусными дисками.

Суммарное радиальное давление F_r по углу обхвата конусных дисков составляет

$$F_r = F_0\alpha, \qquad (3)$$

где F_0 – начальное натяжение ремня.

Подставляя в уравнение (1) последовательно зависимости (2) и (3), получим:

$$\Delta T = F_0Df\alpha / 4\sin(\varphi/2). \qquad (4)$$

Уравнение (4) является базовым при проведении проектного и проверочного расчетов демпферного устройства измерителя крутящего момента средней величины.

Так, зная величину ΔT и задавшись по требованиям конструкции размером конусных дисков D, коэффициентом трения f ремня по конусным дискам f = 0,16…0,17, углом обхвата $\alpha \geq 180°$ и углом желоба $\varphi \approx 36°$, определяем начальное натяжение ремня F_0 по зависимости [5]:

$$F_0 = \frac{4\Delta T \sin\frac{\varphi}{2}}{Df\alpha}. \qquad (5)$$

Затем, задавшись напряжением σ_0 от начального натяжения в ремне [6], определяем расчетную площадь поперечного сечения ремня А:

$$A = F_0 / \sigma_0 \qquad (6)$$

и по ней подбираем ремень стандартного сечения по ГОСТ 1284.1-89.

По полученному таким образом сечению ремня проверяются принятые ранее расчетные диаметры конусных дисков и натяжного ролика, которые должны быть не менее минимально допускаемого для принятого сечения ремня, а по окончательно принятому диаметру D конусных дисков окончательно принимается угол желоба φ для ремня по рекомендациям нормативных материалов на ремни и шкивы.

По зависимости (4) окончательно проверяется правильность выбранных ранее параметров и в случае необходимости производится их корректировка.

Испытания описанной конструкции измерителя крутящего момента средней величины проводились на цепном приводе с частотой вращения ведомой звездочки при оборотах, близких 500, 1000 и 1500 мин.$^{-1}$, крутящим моментом $T_н$ = 50 Н·м, ремнем сечения Б, диаметральными размерами конусных дисков и шкива D = 0,2 м, угле желоба φ = 36°. Торможение ведомого вала цепной передачи осуществлялось ленточным тормозом, барабан которого по рабочей поверхности имел разную шероховатость.

Напряжение начального натяжения ремня было σ_0 = 1,6 Н/мм^2. Запись показаний нагрузки осуществлялась на осциллографе Н-104 со съемом нагрузок средней величины крутящего момента непосредственно с измерителя крутящего момента средней величины и с ведомого вала цепного привода.

В результате обработки осциллограмм были установлены следующие режимы работы:

- максимальное отклонение ΔT от номинальной нагрузки составило 20% при частоте вращения ведомой звездочки около 1500 мин.$^{-1}$;
- отклонение величины крутящего момента от средней его величины имело в большей мере случайный характер;
- отклонение средней величины крутящего момента по осциллограммам и показаниям крутящего момента средней величины составило около 1%, что наиболее вероятно относилось к погрешностям обработки осциллограмм;
- при резком затормаживании и сбросе нагрузки с привода наблюдалось проскальзывание ремня по конусным дискам в течение примерно 0,05 с;
- при изменении нагруженности привода показания средней величины передаваемого крутящего момента практически мгновенно приводятся в соответствие с передаваемой нагрузкой;

- с увеличением частоты вращения измерителя крутящего момента средней величины его чувствительность к изменениям нагруженности увеличивается;
- отмечается очень высокая чувствительность измерителя крутящего момента средней величины на изменение передаваемой нагрузки: при увеличении начального натяжения ремня на холостом ходу передачи фиксировалось увеличение момента сопротивления проворачиванию ведомого вала в опорах.

Вывод. Испытаниями измерителя крутящего момента средней величины для механического привода установлена высокая точность измерения данного параметра, а также высокая чувствительность прибора к изменениям нагрузки в приводах машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко П. М. Автоматизация процессов сельскохозяйственного производства / П. М. Василенко, И. И. Василенко. – М. : Колье, 1972. – 575 с.
2. Фролов Л. Б. Измерение крутящего момента / Л. Б. Фролов. – М. : Энергия, 1974. – 120 с.
3. А. с. № 555303 СССР, МПК G 01 L 3/18. Измеритель крутящего момента механических передач / Н. И. Хабрат. – № 2327831/10 ; заявл. 23.02.76 ; опубл. 23.06.77. Бюл. № 15.
4. Карандеев К. Б. Специальные методы электрических измерений / К. Б. Карандеев. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1983. – 344 с.
5. Решетов Д. Н. Детали машин / Д. Н. Решетов. – М. : Машиностроение, 1989. – 496 с.
6. Пронин Б. А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (вариаторы) / Б. А. Пронин, Г. А. Ревков. – М. : Машиностроение, 1967. – 404 с.

УДК 621.855:658.512.2(031)

Хабрат Н. И., Абибуллаев Э. А.,
Умеров Э. Д., Сулейманов Э. С.

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ, РАСЧЕТ И ИСПЫТАНИЯ ЦЕПНЫХ ПЕРЕДАЧ С ПОВЫШЕННЫМИ ПЕРЕДАТОЧНЫМИ ОТНОШЕНИЯМИ

З аналізу роботи ланцюгового привода намічені шляхи його вдосконалення, розроблений розрахунок і основи проектування ланцюгових передач з підвищеними передавальними відносинами тривалої працездатності.

Ключові слова: *ланцюгова передача, передавальне відношення, число зубів зірочок, крок ланцюга, знос ланцюга.*

Из анализа работы цепного привода намечены пути его совершенствования, разработан расчет и основы проектирования цепных передач с повышенными передаточными отношениями длительной работоспособности.

Ключевые слова: *цепная передача, передаточное отношение, число зубьев звездочек, шаг цепи, износ цепи.*

From the analysis of the chain drive the ways of its improvement, developed calculation and principles of design chain drives with higher ratios longer service life.

Key words: *chain drive, the gear ratio, the number of sprocket teeth, chain pitch, wear chain.*

Постановка проблемы. Цепная передача в приводах машин различного рода производств нашла широкое применение благодаря ее простоте конструктивного исполнения, эксплуатации, возможности передачи больших нагрузок между валами на значительных расстояниях.

В настоящее время в тех случаях, когда необходимо создать привод между параллельными валами с повышенными передаточными отношениями, например, более 6, а тем более 20–40, предпочтение, безусловно, отдается зубчатой передаче. Это приводы механизмов поворота кранов, бетоновозов, различного рода сушильных камер, смесителей и других машин. В этом случае изготавливаются зубчатые колеса, иногда – с диаметральными размерами более 2-х метров, которые не только сложны в изготовлении, но и представляют определенные трудности монтажа на машинах.

В сложившейся практике проектирования приводов при значительных передаточных отношениях цепные передачи не применяются из-за того, что приводная цепь, получив незначительное удлинение, теряет зацепление со звездочкой большего диаметрального размера.

Анализ литературных источников. В специальных технических источниках информации [1; 2] рекомендуется в цепных передачах со втулочно-роликовой цепью принимать наибольшее число зубьев звездочек не более 100–120, с зубчатой цепью – не более 120–140 зубьев и при этом увеличение шага цепи в процессе эксплуатации не превышает 2,3…3,0% вследствие потери зацепления его с большей звездочкой [3]. Ре-

комендации по восстановлению зацепления цепи со звездочкой в вышеперечисленных источниках отсутствуют.

Цель данной **работы** – разработка конструкций цепных передач с повышенными передаточными отношениями, обеспечивающими их длительную работоспособность.

Изложение основного материала. Рассмотрим сначала механизм потери зацепления цепи со звездочкой. Представим себе цепную передачу со звездочками с числом зубьев $z_1 = 15$ и $z_2 = 120$ и втулочно-роликовой цепью, что соответствует рекомендациям [2; 3], и условным шагом $p = 1$.

Для этих звездочек диаметры делительных окружностей $d_д$ и окружностей выступов $D_в$ определяются по зависимостям [1–3]:

$$d_д = p\,\mathrm{cosec}\frac{180°}{2}, \qquad (1)$$

$$D_в = p\left(0{,}5 + \mathrm{ctg}\frac{180°}{2}\right). \qquad (2)$$

В работе [3] указывается, что вследствие износов в шарнирах цепи ее шаг увеличивается и при достижении определенной величины происходит потеря зацепления со звездочкой большего диаметрального размера. Следовательно при износе шарниров цепи на 2% ее шаг составляет $p' = 1{,}02p$.

В этом случае условные диаметры, на которых будут располагаться шарниры цепи, на принятых к рассмотрению звездочках составят при новых цепях:

$$d_{д15} = p\,\mathrm{cosec}\frac{180°}{z_1} = 1\,\mathrm{cosec}\frac{180°}{15} = 4{,}81,$$

$$d_{д120} = p\,\mathrm{cosec}\frac{180°}{z_2} = 1\,\mathrm{cosec}\frac{180°}{120} = 38{,}20,$$

и при изношенных на 2%:

$$d_{д15} = p'\,\mathrm{cosec}\frac{180°}{z_1} = 1{,}02\,\mathrm{cosec}\frac{180°}{15} = 4{,}91,$$

$$d_{д120} = p'\,\mathrm{cosec}\frac{180°}{z_2} = 1{,}02\,\mathrm{cosec}\frac{180°}{120} = 38{,}965.$$

Определим величину углового шага γ_z этих звездочек при

$z_1 = 15$, $\gamma_{z15} = 360° / 15 = 24°$;

$z_2 = 120$, $\gamma_{z120} = 360° / 120 = 3°$.

Анализ расчетных значений радиального смещения шарниров цепи по высоте зубьев звездочек показывает, что для одной и той же цепи величина удлинения шага значительно возрастает с увеличением числа зубьев в звездочке. Это объясняется уменьшением углового шага звездочек с увеличением в ней числа зубьев.

На рис. 1 в масштабе иллюстрируется радиальное смещение шарниров цепи по зубьям звездочек с числом зубьев $z = 15$ и 120, которое на ведомой звездочке в 7,5 раза больше чем на ведущей.

Поэтому в ряде случаев цепь находится в нормальном зацеплении со звездочкой с малым числом зубьев и теряет зацепление со звездочкой с большим числом зубьев.

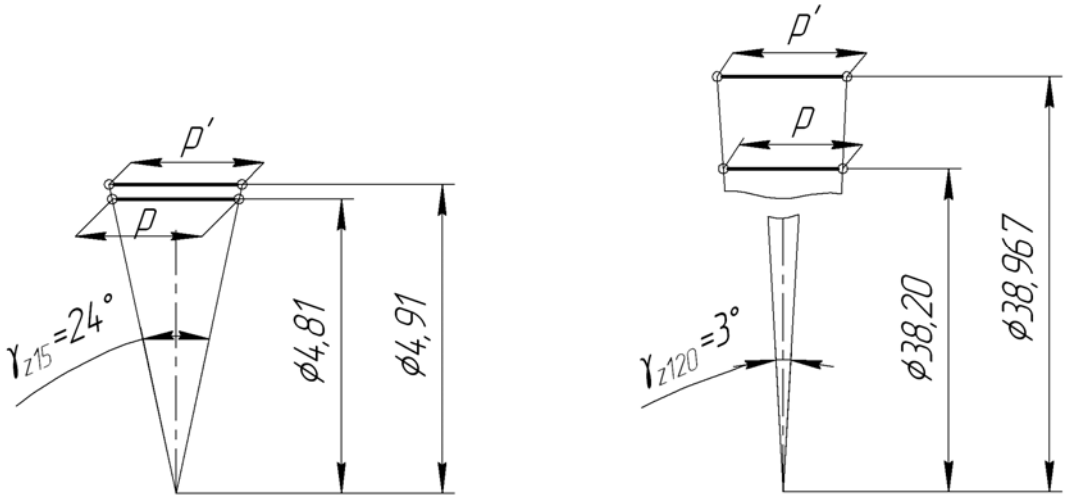

Рис. 1. Схема иллюстрации изменения расположений шарниров цепи по высоте зубьев звездочек с z = 15 и 120 при износе (удлинении) шага цепи на 2%.

В работе [1] приводится аналитическая зависимость для определения диаметрального размера d_{max} расположения шарниров роликовой цепи, при котором она полностью теряет зацепление с зубьями звездочки вида

$$d_{max} = p\left(1{,}3 + \mathrm{ctg}\frac{180°}{z}\right). \qquad (3)$$

Определим эти условные максимальные диаметры для принятых нами ранее звездочек:

$$d_{max\,z15} = 1\left(1{,}3 + \mathrm{ctg}\frac{180°}{15}\right) = 6{,}005,$$

$$d_{max\,z120} = 1\left(1{,}3 + \mathrm{ctg}\frac{180°}{120}\right) = 39{,}49.$$

Используя зависимость (1), определим величину шага цепи при полной потере зацепления с зубами звездочек при ранее принятом числе зубьев.

$$z = 15$$

$$p_{\max} = d_{\max z1} \sin\frac{180°}{z_1} = 6{,}05 \sin\frac{180°}{15} \approx 1{,}25$$

$$z = 120$$

$$p_{\max} = d_{\max z2} \sin\frac{180°}{z_2} = 39{,}49 \sin\frac{180°}{120} \approx 1{,}034$$

При удлинении шага цепи по приведенному выше расчету на 3,4% расположение шарниров цепи на малой звездочке с z = 15 на делительном диаметре по зависимости (1) составит

$$d'_{дz15} = 1{,}034 \operatorname{cosec}\frac{180°}{15} = 4{,}97\,,$$

что составляет всего лишь

$$\frac{d'_{д15} - d_{дz15}}{d_{дmax15} - d_{д15}} \cdot 100\% = \frac{4{,}97 - 4{,}81}{6{,}005 - 4{,}81} = 13{,}4\%$$

использования теоретической высоты подъема цепи на малой звездочке при полном использовании высоты подъема цепи на большей звездочке.

Из анализа этого расчета следует, что для повышения работоспособности этой цепной передачи следует:

- либо заменить износившуюся цепь на новую;
- либо восстановить шаг в износившейся цепи;
- либо уменьшить число зубьев большой звездочки;
- либо конструктивно диаметр делительной окружности большей звездочки выполнять варьирующим ступенчато в зависимости от степени износа (увеличения шага) приводной цепи.

Рассмотрим далее эти пути повышения работоспособности рассматриваемого цепного привода.

1. Заменить цепь на новую – дорого.

2. Восстановление прежнего шага цепи. В ГосНИТИ эта задача решалась путем нагрева отдельных пластин цепи ТВЧ и последующего их укорачивания. Это решение не нашло практического применения.

3. Уменьшение числа зубьев большой звездочки при сохранении передаточного отношения достигается введением двухступенчатой цепной передачей. Так, например, на одноступенчатом приводе мотовила жатки ЖВН-6 в большей звездочке было 56 зубьев с шагом p = 15,875 мм. Втулочно-роликовая цепь быстро изнашивалась, и поэтому заменили одноступенчатый цепной привод на двухступенчатый с уменьшением числа зубьев в большей звездочке.

В работе [4] приводится описание цепной передачи сушильной камеры с большим передаточным отношением (рис. 2). Эта передача содержит ведущую звездочку 1 на валу электродвигателя 7, ведомую звездочку 3, установленную на сушильном барабане 4, натяжную звездочку 8 на раме привода и охватывающую их приводную цепь 2.

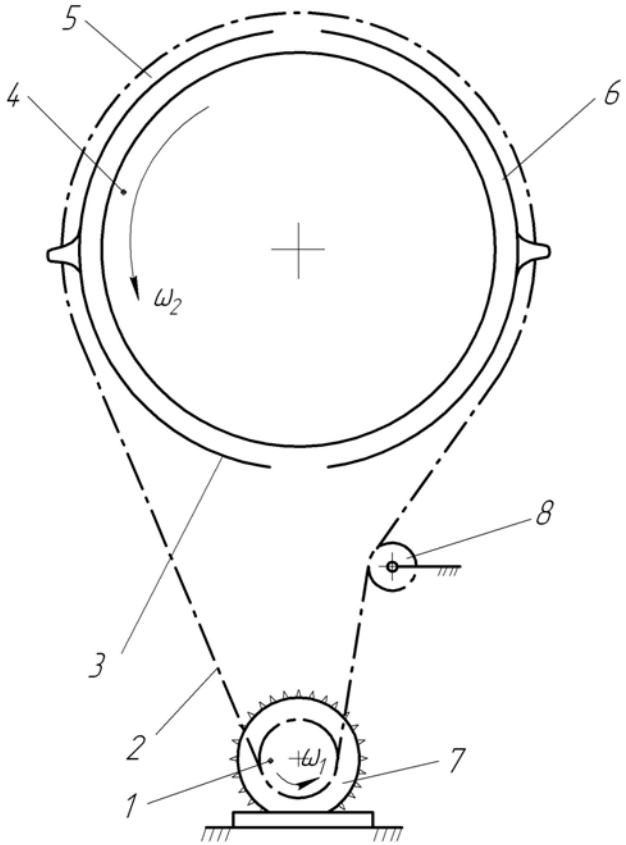

Рис. 2. Схема цепного привода.

Звездочка 3 выполнена в виде двух дуг полуокружностей 5 и 6, на серединах которых имеются по одному зубу, аналогичных зубьям на звездочках (рис. 3).

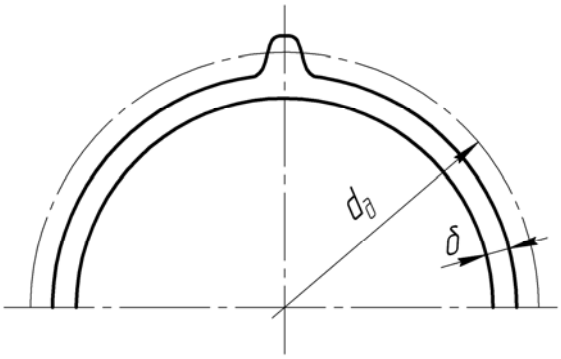

Рис. 3. Эскиз дуги звездочки.

Дуги 5 и 6 закрепляются на барабане 4 так, чтобы по периметру барабана с двух сторон расстояния между зубьями были бы строго одинаковыми и кратными шагу приводной цепи. На-

тяжная звездочка устанавливается в обязательном порядке только на ведомой ветви цепного привода, и в процессе эксплуатации привода ее положение корректируется, создавая некоторое весьма незначительное натяжение цепи.

При увеличении шага цепи в процессе эксплуатации под обе дуги подкладываются подкладки толщиной δ, которые зажимаются креплениями дуг 5 и 6 и тем самым увеличивают делительный диаметр на большей звездочке. Рассмотрим расчет толщины прокладки δ.

В соответствии с рекомендациями [3] определяется максимальная величина износа (удлинения) шага цепи x в процентах по зависимости

$$x_{\max} = 200 / z \qquad (4)$$

и для дальнейших расчетов принимается только (50…75)% ее максимальной величины, т. е.

$$x \le (0{,}50\ldots0{,}75)\ x_{\max}. \qquad (5)$$

В этом случае толщину прокладки δ найдем как полуразность диаметров, на которых находятся шарниры роликовой цепи новой и изношенной на звездочке, т. е.

$$\delta = 0{,}5\left[(p+x)\operatorname{cosec}\frac{180^\circ}{z} - p\operatorname{cosec}\frac{180^\circ}{z}\right] = 0{,}5\,px\operatorname{cosec}\frac{180^\circ}{z}. \qquad (6)$$

Пример расчета. Определить толщину прокладки для цепной передачи с числом зубьев на большей звездочке z_2 = 120, работающей со втулочно-роликовой цепью с шагом p = 50,8 мм.

Определяется величина износа (удлинения) шага цепи с учетом зависимостей (4) и (5):

$$x = 0{,}75\frac{200}{120} = 1{,}25\%.$$

Толщина прокладки для втулочно-роликовой цепи с шагом 50,8 мм составит (6):

$$\delta = 50{,}8\cdot 0{,}0125\operatorname{cosec}\frac{180^\circ}{120} = 12 \text{ мм}.$$

После установки прокладки под дуги с зубьями на большей звездочке приводной цепи на ведомой ветви должно быть установлено необходимое натяжение, тогда эта цепь на ведомой звездочке будет работать в зацеплении как новая.

Предложенная конструкция была испытана на приводе бетономешалки с числом зубьев ведомой звездочки эквивалентным 100, втулочно-роликовой цепью с шагом 25,4 мм. При износе (удлинении) шага цепи на 1% под дуги с одним зубом была установлена прокладка толщиной 4 мм. После этого цепной привод продолжал работать в нормальных условиях зацепления цепей со звездочками.

Вывод. Предложенный способ восстановления зацепления приводной цепи со звездочкой большего диаметрального размера позволяет увеличить срок эксплуатации приводных цепей при больших передаточных отношениях цепных передач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Готовцев А. А. Проектирование цепных передач / А. А. Готовцев, Г. Б. Столбин, И. П. Котенок. – М. : Машиностроение, 1973. – 384 с.
2. Решетов Д. Н. Детали машин / Д. Н. Решетов. – М. : Машиностроение, 1989. – 496 с.
3. Машиностроение. Энциклопедия : в 40 т. – Т. IV-1. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка / [ред. кол. Д. Н. Решетов, А. П. Гусенков, Ю. Н. Дроздов и др.] ; под общ. ред. Д. Н. Решетова. – М. : Машиностроение, 1995. – 864 с.
4. Пат. № 37361 Украина. МПК F 16 G 13/00. Цепная передача / Н. И. Хабрат, Э. А. Абибуллаев ; заявители и патентообладатели – авторы ; заявл. 10.06.08 ; опубл. 25.11.08. Бюл. № 22.

УДК 620.91:662.97

Ягьяев Э. Э.

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА КОМБИНИРОВАННОЙ СОЛНЕЧНО-ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

У статті описаний концептуальний проект комбінованої сонячно-газогенераторної електростанції з параболічними концентраторами і піролізної установкою, що працює на твердих побутових відходах.

Ключові слова: *сонячна енергія, параболічний концентратор, піроліз, твердо побутові відходи.*

В статье описан концептуальный проект комбинированной солнечно-газогенераторной электростанции с параболическими концентраторами и пиролизной установкой, работающей на твердых бытовых отходах.

Ключевые слова: *солнечная энергия, параболический концентратор, пиролиз, твердо бытовые отходы.*

This paper describes a conceptual design of a combined solar-gas-generating power plants with parabolic concentrators and pyrolysis plants using municipal solid waste.

Keywords: *solar energy, parabolic concentrator, pyrolysis, solid waste.*

Постановка проблемы. Энергетические ресурсы стремительно дорожают и в значительной мере влияют на экономическое развитие Украины и Крыма. Это заставляет искать новые способы получения дешевой и экологически чистой энергии. Проблема развития альтернативных способов получения энергии становится особо актуальной в настоящее время. В то же время остро стоят вопросы по уборке и переработке бытового мусора. Его объемы постоянно увеличиваются и превращаются в проблему мирового масштаба. Одними из основных задач, стоящих перед людьми, являются разработка новых технологий переработки бытовых отходов, сокращение площадей, выделенных под свалки, уменьшение загрязнения окружающей среды.

Анализ литературы. В общем объеме роста альтернативных направлений энергообеспечения приоритеты отдаются ветроэнергетике. Это связано с ограниченной возможностью временного диапазона использования солнечной энергии в зависимости от смены дня и ночи и состояния атмосферы. И все же солнечная энергия в региональном плане может играть существенную роль в энергообеспечении, особенно на локальном коммунально-бытовом уровне [1].

В настоящее время существует несколько основных способов использования солнечной энергии:

- получение тепла путем прямого поглощения солнечной энергии приемной поверхностью;
- получение электроэнергии с использованием фотоэлементов;
- преобразование солнечной энергии в электрическую с помощью поршневых или турбинных тепловых машин.

Для варианта фотоэлектрического преобразования, вследствие теоретических ограничений, строительство крупных солнечных электростанций требует больших площадей, что может привести к нарушению местного микроклимата. Стоимость солнечных фотоэлементов пока остается высокой, хотя наблюдается быстрое снижение себестоимости и существенное повышение КПД преобразования энергии. Метод использования фотоэлементов является перспективным и быстроразвивающимся.

Наиболее технологически простым и экономически эффективным способом использования солнечной энергии является прямое преобразование солнечной энергии в тепловую путем нагрева теплоносителя [2; 3]. Область применения солнечных коллекторов – системы отопления жилых и производственных зданий, горячего водоснабжения, а также энергетические установки с низкокипящим рабочим телом, где уровень нагрева теплоносителя не превышает 50–80°С. Практически полностью устранить потери теплоты в окружающую среду за счет теплопроводности и конвекции позволяют коллекторы с вакуумированным пространством между поглощающей поверхностью и окружающей средой.

Солнечные технологии в зависимости от количества уровней преобразования энергии подразделяются на две группы:

- прямые технологии, преобразующие солнечную энергию непосредственно в ходе одного этапа;
- непрямые технологии, включающие в себя несколько этапов преобразования и трансформации различных видов энергии, конечным результатом которых является получение электроэнергии.

Цель статьи – описание концепции инновационного проекта комбинированной солнечно-газогенераторной электростанции с параболическими концентраторами и пиролизной установкой, работающей на твердых бытовых отходах.

Изложение основного материала. Примером непрямого использования солнечного излучения могут служить солнечные станции с параболическими концентраторами (рис. 1 и 2).

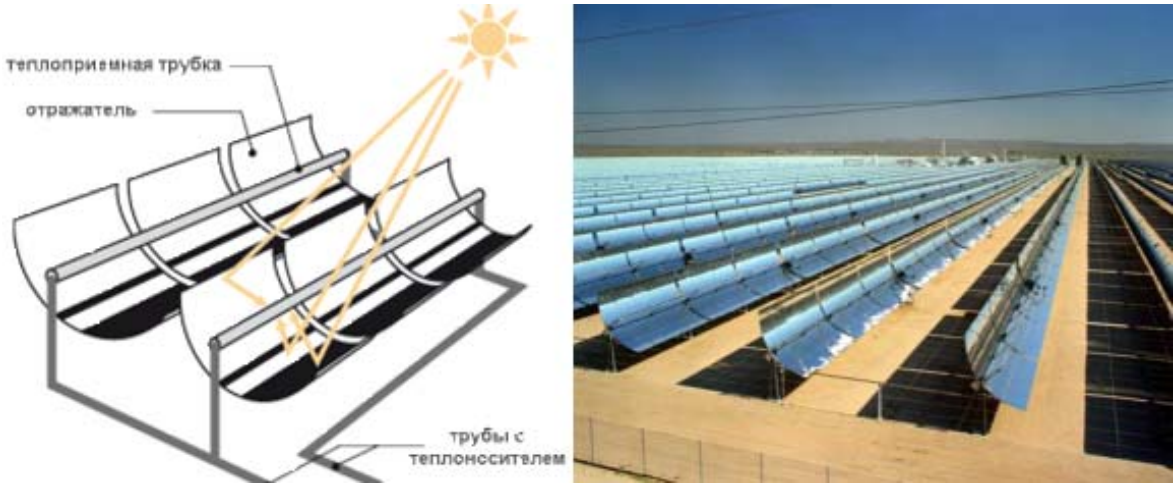

Рис. 1. Солнечные параболоцилиндрические концентраторы.

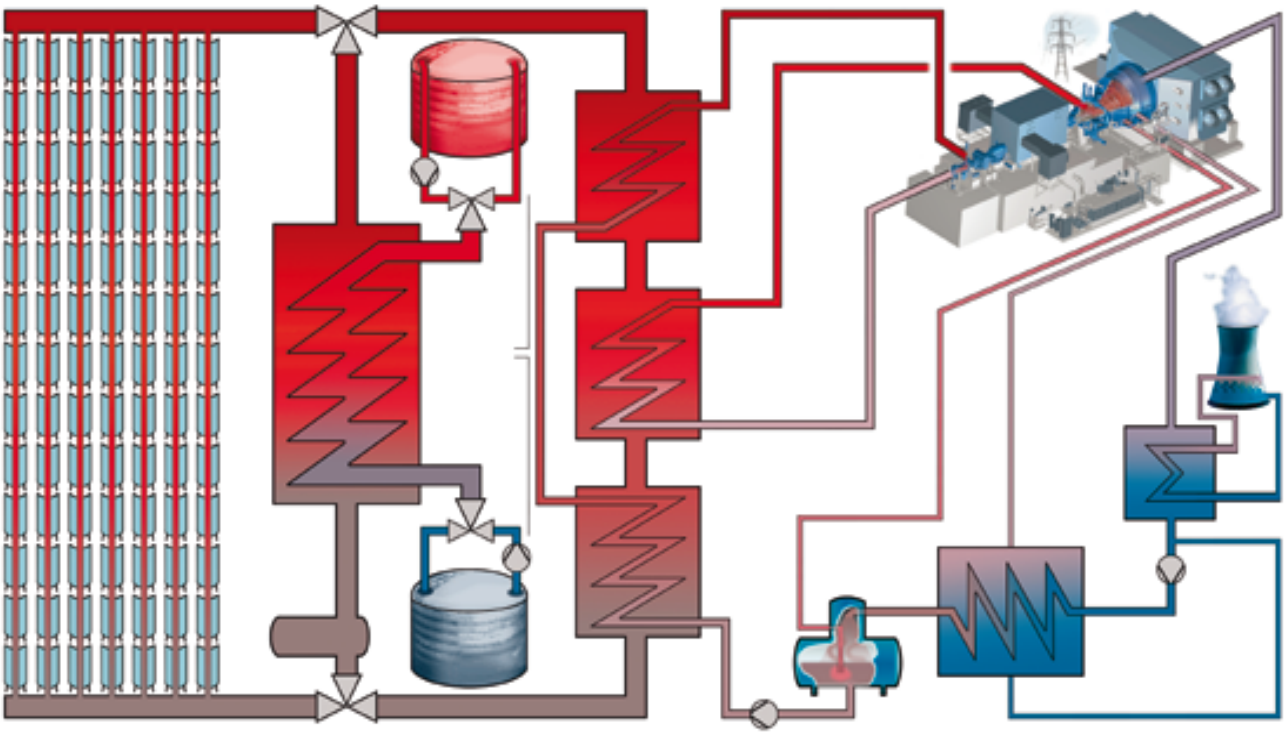

Рис. 2. Солнечная электростанция с параболическими концентраторами.

Солнечные станции с параболическими концентраторами состоят из многочисленных расположенных параллельно рядов концентраторов, которые являются параболическими отражателями. Эти отражатели концентрируют солнечное излучение вдоль теплоприёмной трубки. В данной трубке циркулирует теплоноситель на основе масла, разогреваясь до 400 °С. Разогретая жидкость поступает на теплообменный аппарат, где вода преобразовывается в пар при температуре около 390 °С. Этот пар поступает на парогенератор, где происходит процесс преобразования электроэнергии так же, как на обычных электростанциях. В турбине тепловая энергия пара переходит в кинетическую энергию движущейся струи пара. Пар, проходя с большой скоростью между лопатками турбины, заставляет ротор турбины вращаться. Механическая энергия вала турбины передается электрогенератору, в котором она превращается в электрическую.

Важнейшее достоинство солнечных станций с параболическими концентраторами – простота и относительная дешевизна изготовления их вполне эффективных вариантов, сочетающиеся с неприхотливостью в эксплуатации. Другое важнейшее достоинство коллекторов заключается в том, что они способны уловить и преобразовать в тепло до 90% попавшего на них солнечного излучения. Поэтому не только в ясную погоду, но и при лёгкой облачности КПД коллекторов превосходит КПД фотоэлектрических батарей. Наконец, неравномерность засветки поверхности не вызывает непропорционального снижения эффективности коллектора – важен лишь общий (интегральный) поток излучения.

Основным препятствием массового распространения солнечных электростанций является остановка их работы ночью и при пасмурной погоде. Решение этой проблемы сейчас выглядит таким образом – создание гибридной солнечной электростанции. В случае отсутствия или недостатка солнечной радиации электроэнергия вырабатывается за счет печей на природном газе или угле.

Одним из наиболее перспективных направлений замены традиционных печей на газе и угле является применение в качестве топлива твердых бытовых отходов.

Предлагается возможность создания комбинированной солнечной электростанции: при отсутствии или недостатке солнечной радиации электроэнергия будет вырабатываться за счет пиролизной установки, работающей на твердых бытовых отходах (рис. 3).

При традиционных способах переработки бытовых и промышленных отходов выделяется много вредных веществ, участвующих в образовании парникового эффекта на планете. Важным преимуществом применения мусора в качестве топлива является минимальный выброс углекислого газа в процессе работы. Как минимум 80% выбросов можно было бы предотвратить, заменив традиционные мусоросжигательные заводы на пиролизные. Этим способом можно решить и проблему утилизации мусора, очистив значительные территории Крыма и Украины.

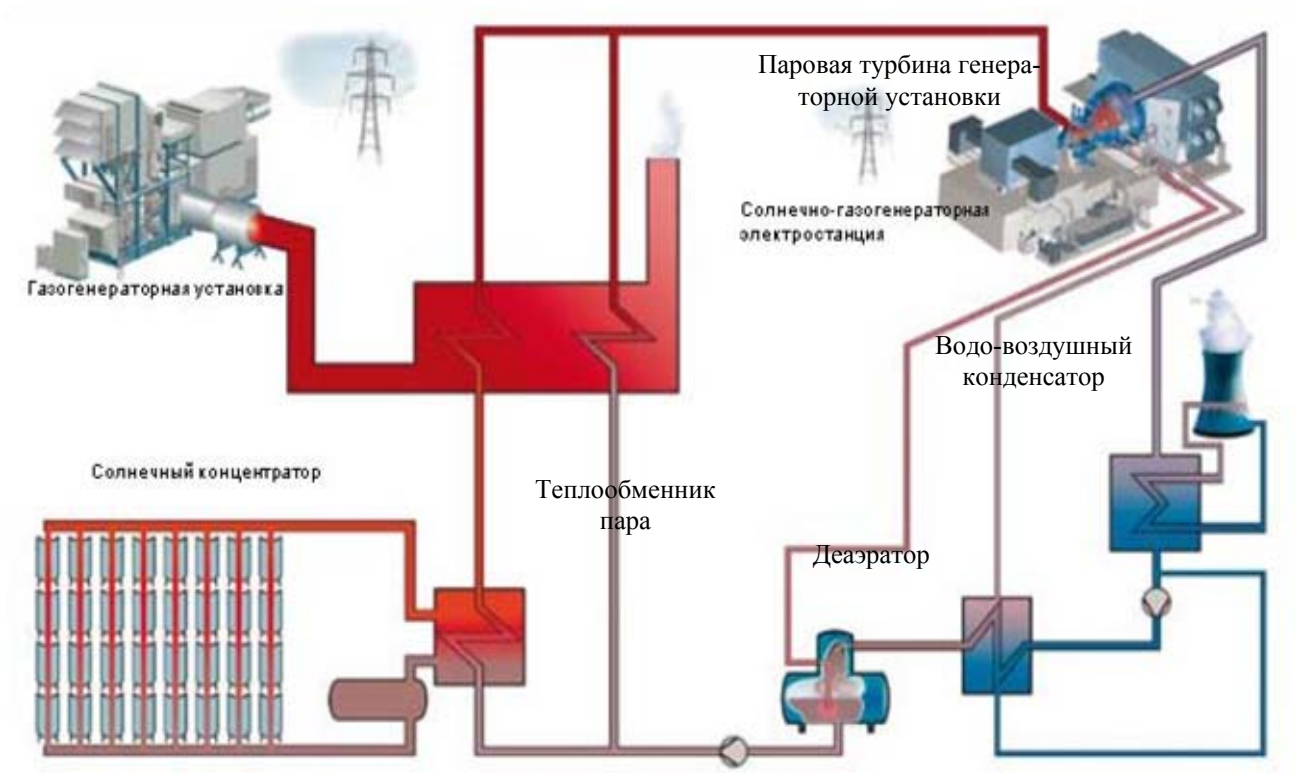

Рис. 3. Комбинированная солнечно-газогенераторная электростанция.

Предлагаемый способ термической переработки бытовых и промышленных отходов может быть эффективно реализован в стационарных условиях на территории свалки или промышленного предприятия. Расширяя область применения предлагаемого способа, можно предложить использование горячего пара для отопления жилых построек.

Пиролизную установку для термической переработки бытовых и промышленных отходов можно применить согласно работе [4] которая будет работать более экономично на горючих газах и горючей жидкости, получаемых при пиролизе отходов, а выработанная двигателем через генератор электроэнергия пойдет полностью для работы приводов газогенератора и для дожигания выхлопных и дымовых газов.

Коэффициент полезного действия от предлагаемого способа переработки отходов возрастает за счет замкнутости цикла, когда горючие продукты переработки отходов возвращаются в газогенератор или в двигатель, остаются на выходе только золы, шлаки и сажа, которые по новым технологиям могут быть использованы в дорожном строительстве, при производстве красителей и т. п. Выгрузку зольных остатков и шлаков целесообразно производить путем их встряхивания при вращении колосниковой решетки.

Сущность процесса поясняется чертежом, где на блок-схеме представлено пиролизное устройство для термической переработки бытовых и промышленных отходов (рис. 4). Пиролизное устройство содержит генератор 1 с теплоизолирующим кожухом и камерами 3 и 4 дозированной загрузки и выгрузки зольных остатков и шлаков, а также швелькамеру 5 с приводом 6 (мотор-редуктор) прямой и обратной подачи исходных отходов и продуктов их пиролиза. Верхняя часть газогенератора 1 сообщена с газоотводом 7 и 8, а нижняя часть сообщена с патрубком 9 подвода выхлопных газов двигателя 10. Газоотводный патрубок 8 сообщается с катализатором 11 для отделения угарного газа и далее с камерой прокаливания остатков дымовых и выхлопных газов 12, а газоотвод 7 выполнен сообщающимся с конденсатором горючих газов 13 и патрубками подвода горючих газов 14 и горючих жидких продуктов 15 в дозатор 16 двигателя 10. При этом внутренние стенки газогенератора 1 швелькамеры 5 образуют замкнутый тороидальный контур циркуляции отходов, выполнены с встроенными теплоэлектронагревателями 17, образующими воздухонагреватели внутри газогенератора замкнутого контура и соединенными электрической цепью с электрогенератором 18 двигателя 10, причем коническая колосниковая решетка 19 швелькамеры 5 выполнена вращающейся. Привод 6 и камера прокаливания 12 соединены электрической цепью с электрогенератором 18.

Пиролизное устройство для термической переработки бытовых и промышленных отходов работает по предлагаемому способу следующим образом.

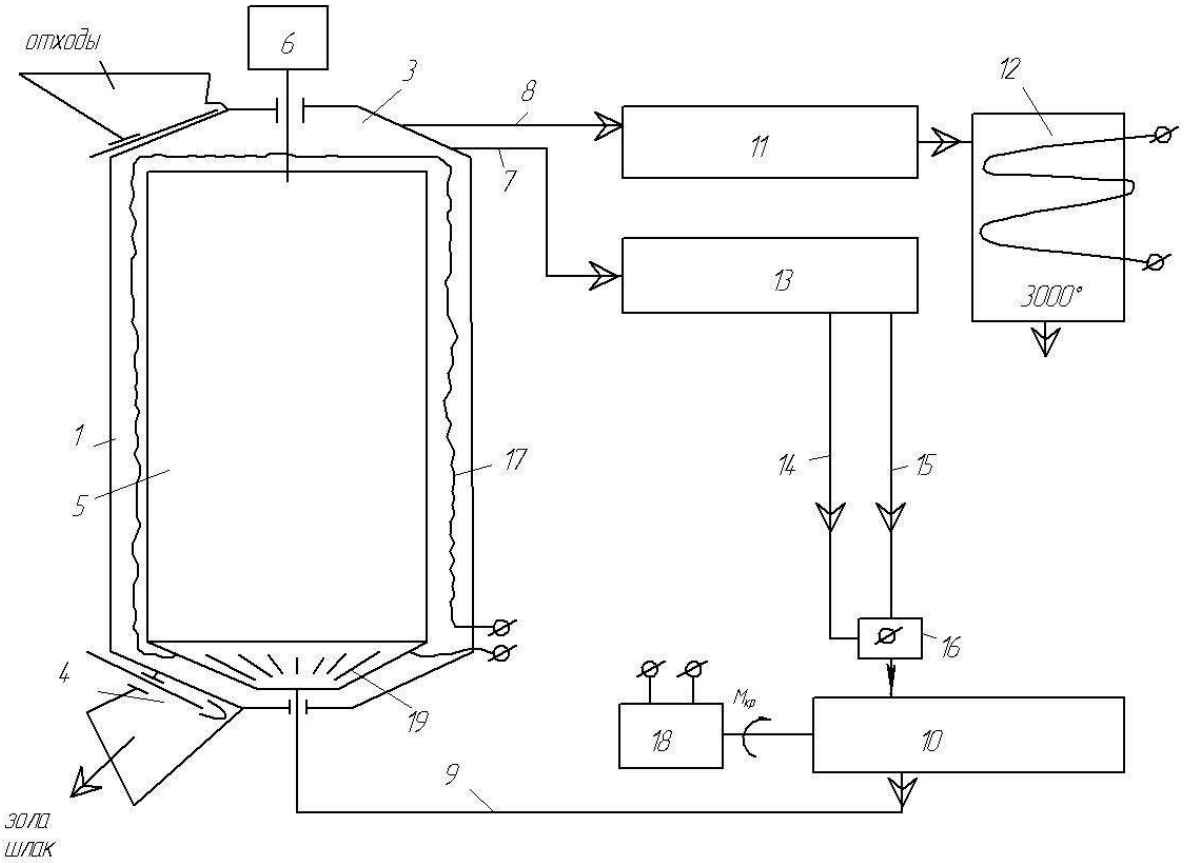

Рис. 4. Блок-схема пиролизной установки.

Перед загрузкой устройства отходами в патрубок подвода выхлопных газов 9 двигателя 10 подают горячие выхлопные газы и включают теплоэлектронагреватели 17 и привод 6 прямой и обратной подачи, питающиеся от электрической энергии электрогенератора 18, связанного с работающим двигателем. Газогенератор 1 в теплоизолирующем кожухе прогревают. Отходы, очищенные от металлического лома и строительного мусора, дозированно подаются в загрузочное окно газогенератора 1 и швелькамеры 5, в рабочей полости которой они подвергаются пиролизу и при перемешивании попадают на колосниковую решетку 19 конической формы. Часть зольных остатков и шлаков проходит через колосники к окну выгрузки, а непроработанную часть мусора поднимают вверх, продолжая пиролиз отходов до их выноса в верхнюю полость газогенератора 1, и снова подают вниз по замкнутому контуру.

Пиролиз отходов проводят путем перемещения отходов в горючих газах с выжиганием углеродистых остатков. Зольные остатки просеиваются через колосниковую вращающуюся решетку 19, накапливаются и периодически выгружаются. Проход дымовых и горючих газов, а также выхлопных газов двигателя ведется по всей высоте швелькамеры 5. Далее накапливающиеся в верхней полости генератора дымовые и выхлопные газы поступают через газоотводный патрубок 8 в катализатор отделения угарного газа 11 и далее в камеру прокаливания остатков 12 при t = 3000 °С. Горючие газы из верхней части газогенератора направляют в газоотвод 7, конденсируют в жидкие продукты в конденсаторе 13 и направляют через патрубки 14 и 15 в дозатор 16 двигателя.

Способ позволяет производить пиролиз отходов по всему замкнутому контуру по всей высоте швелькамеры теплоэлектронагревателями и горючими выхлопными газами при заданной температуре без ее перепада. Дымовые и выхлопные газы после газогенератора подвергаются очистке и полному дожиганию путем прокаливания остатков в камере прокаливания без выноса вредных частиц в атмосферу. Вращающаяся колосниковая решетка лучше выносит остатки пиролиза при очистке швелькамеры.

Выводы. Соединение технологии создания электричества параболическими концентраторами и возможности использования пиролизной установки, работающей на твердых бытовых отходах, является инновационным решением, отличающимся следующими преимуществами:

- простотой и относительной дешевизной изготовления, что является важнейшим достоинством солнечных станций с параболическими концентраторами;

- способностью параболических концентраторов уловить и преобразовать в тепло до 90% попавшего на них солнечного излучения;
- возможностью в случае отсутствия или недостатка солнечной радиации вырабатывать электроэнергию за счет пиролизной установки, работающей на твердых бытовых отходах.

Применение ТБО в виде топлива позволит существенно уменьшить затраты на получение электроэнергии, снизить выброс вредных веществ в атмосферу, постепенно очистить территорию Крыма и Украины от мусора и производить собственную дешевую энергию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев С. В. Солнечные электростанции / С. В. Андреев. – М. : Наука, 2002. – 296 с.
2. Рубан С. С. Нетрадиционные источники энергии / С. С. Рубан. – М. :Энергия, 2003. – 180 с.
3. Курис Ю. В. Технологии комбинированной выработки энергии: возможности и перспективы / Ю. В. Курис // Энергетика и электрификация. – 2007. – № 10. – С. 13–17.
4. Сергеев В. В. Теплоэнергетические основы промышленной слоевой газификации растительной биомассы : автореф. дис. … докт. техн. наук : спец. 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» / В. В. Сергеев. – СПб., 2009. – 32 с.

УДК 621.9.026

Абдулгазис Д. У., Абдулгазис У. А.,
Мевлют Ш. Т., Умеров Э. Д.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНДОТЕРМИЧЕСКИХ ПРИСАДОК К СОТС

Тепловий баланс процесу різання представлений за участю ендотермічної присадки до масляних МОТЗ. Отримано залежності зміни ентальпії ендотермічних присадок від температури МОТЗ і впливу співвідношення маси присадки до маси олії-матриці на зниження температури МОТЗ в зоні різання.

Ключові слова: *ендотермічні присадки, масляні МОТЗ, ентальпія, масло-матриця.*

Тепловой баланс процесса резания представлен с участием эндотермической присадки к масляным СОТС. Получены зависимости изменения энтальпии эндотермических присадок от температуры СОТС и влияния соотношения массы присадки к массе масла-матрицы на снижение температуры СОТС в зоне резания.

Ключевые слова: *эндотермические присадки, масляные СОТС, энтальпия, масло-матрица.*

Heat balance of the cutting process is presented with an endothermic additives to oil CLTT. The dependences of the enthalpy change of the temperature endothermic additives CLTT and influence weight ratio to the weight of the oil additive matrix to reduce the temperature in the cutting CLTT.

Key words: *endothermic additives, oil CLTT, enthalpy, oil matrix.*

Постановка проблемы. Наиболее распространенным способом отвода избыточного тепла из зоны резания является простое обмывание жидким (вода, растительное или минеральное масло) или газообразным (воздух, охлажденные инертные газы) охладителем путем отвода тепла по классическим схемам физического процесса теплообмена и теплопередачи. Количественный эффект отвода тепла из зоны резания определяется в данном случае величиной теплоемкости воды, масла или воздуха и скоростью обтекания (временем пребывания в зоне резания) единичной порции охлаждающего материала.

В общем виде динамика теплового потока при этом складывается из отбора тепла охладителем как со стороны обрабатываемой детали, так и со стороны резца практически в равной мере, то есть со стороны резца теплоотводящая способность охладителя используется только частично, поскольку остальная часть отбирается от обрабатываемой детали. С практической же точки зрения наибольшее значение имеет отвод тепла именно от режущего инструмента, поскольку последний находится под постоянным воздействием квазистатического теплового потока и, одновременно, значительных динамических и субстатических механических напряжений в течение всего процесса резания. Обрабатываемая же деталь при этом характеризуется постоянным смещением зоны резания на участки с более низкой температурой и последующим рассеиванием тепла в окружающее пространство.

Другой особенностью традиционных способов охлаждения зоны резания, особенно жидкостью, воздухом или газами, является весьма короткое время контакта охладителя с зоной резания, составляющее доли секунды. За столь малый промежуток времени охладитель проявляет лишь незначительную часть своего потенциала теплоемкости. Это обстоятельство вынуждает

резко увеличивать расход СОТС для приемлемого уровня отвода тепла из зоны резания, что в свою очередь существенно снижает эффективность и экономику процесса. При этом ухудшаются промсанитария и более активно проявляются коррозионные явления технологического оборудования.

Анализ литературы. В работах [1–3] для повышения теплоотводящей способности масляных СОТС предложено введение присадок, обладающих энергоемким эндотермическим эффектом вызываемым дегидратацией кристаллогидратов. Подобраны наиболее приемлемая кристаллогидратная присадка и условия процесса сверления, при которых наиболее выраженно проявляется эндотермический эффект. Рассмотрены особенности подачи к режущим кромкам сверла масляных СОТС с эндотермическими присадками (ЭТП) [4].

Цель статьи – из теплового баланса процесса резания получить зависимости изменения энтальпии ЭТП от температуры СОТС и влияния соотношения массы ЭТП к массе масла-матрицы СОТС на снижение температуры последней в зоне резания.

Изложение основного материала. Модельное описание теплового баланса для зоны взаимодействия поверхностей стружки и сверла при подаче СОТС с ЭТП можно представить в виде равенства:

$$Q_{\text{с}} + Q_{\text{тр}} = Q_{\text{СОТС}} + Q_{\text{кон}} + Q_{\text{дг}}, \qquad (1)$$

где $Q_{\text{с}}$ – теплота, вносимая в зону взаимодействия стружкой;

$Q_{\text{тр}}$ – теплота, выделяемая трением стружки о сверло;

$Q_{\text{СОТС}}$ – теплота, поглощаемая СОТС за счет ее нагрева;

$Q_{\text{кон}}$ – теплота, уносимая СОТС из зоны взаимодействия за счет конвекции;

$Q_{\text{дг}}$ – скрытая теплота дегидратации присадки к СОТС.

Первым членом левой части равенства – $Q_{\text{с}}$, согласно работе [6], можем пренебречь, поскольку внутренняя поверхность стружки в зоне контакта со сверлом покрывается адсорбционным слоем и ламинарной прослойкой, и, кроме того, типичная скорость выхода стружки из зоны контакта достаточно велика.

Теплоту, выделяемую от работы сил трения стружки о сверло, можно представить равенством:

$$Q_{\text{тр}} = \tau(l) \cdot t \cdot F \cdot V_{\text{с}}, \qquad (2)$$

где $\tau(l)$ – закон распределения касательных напряжений по длине рассматриваемого контакта;

t – продолжительность процесса;

F – площадь фактического контакта стружки и инструмента;

$V_{\text{с}}$ – скорость скольжения стружки по поверхностям резца.

Теплота, поглощаемая СОТС за счет ее нагрева, определяется соотношением

$$Q_{\text{СОТС}} = C \cdot M \cdot T, \qquad (3)$$

где C – удельная теплоемкость СОТС в целом;

M – масса СОТС, участвующая в контактном процессе;

T – температура нагрева СОТС при резании (сверлении).

Теплота, уносимая СОТС из зоны взаимодействия за счет конвекции, записывается как

$$Q_{\text{кон}} = K \cdot F \cdot T \cdot t, \qquad (4)$$

где K – коэффициент теплоотдачи.

Считая использование уравнения коэффициента теплоотдачи Ньютона-Рихмана сложным, Ч. Ф. Якубов предлагает его рассчитывать по методике, изложенной в работе А. Н. Резникова [5].

Скрытая теплота термодеструкционных (экзотермических) реакций СОТС согласно [6] представляется в виде

$$Q_{\text{т.д}} = \alpha \cdot M \cdot \Delta H \cdot t, \qquad (5)$$

где α – доля смазки, участвующая в контактном процессе и подверженная термодеструкции;

$\Delta H_{\text{тд}}$ – энтальпия термодеструкции СОТС или ее компонентов.

Энтальпия термодеструкции, очевидно, будет зависеть от глубины разложения СОТС и может быть определена методом дериватографии как энергия экзотермической реакции.

Теплоту термодеструкции ($Q_{\text{тд}}$) масляной составляющей СОТС далее не будем учитывать, так как цель данной статьи – рассмотреть явление дегидратации ЭТП, которая проходит в общем случае при иных температурах.

Скрытую теплоту дегидратации кристаллогидрата опишем формулой:

$$Q_{\text{д.г}} = M_{\text{к}} \cdot \Delta H \cdot t, \qquad (6)$$

где $M_{\text{к}}$ – масса присадки (кристаллогидрата), введенной в СОТС;

M – масса СОТС в целом, с учетом массы присадки;

ΔH – энтальпия дегидратации кристаллогидрата, зависящая от степени ее обезвоживания, может быть легко определена по дериватограммам как энергия активации отрыва молекул воды от кристаллов.

В дифференциальном виде уравнение (1) с учетом вышеизложенного выглядит следующим образом:

$$F \cdot \tau(l) \cdot V_{\text{с}} \cdot dt = \\ = C \cdot M \cdot dT + k \cdot F \cdot T \cdot dt + M_{\text{к}} \cdot \Delta H_{\text{дг}} \cdot dt \qquad (7)$$

или:

$$\frac{F}{M}\tau(l)V_{\text{с}} = C\frac{dT}{dt} + k\frac{F}{M}T + \frac{M_{\text{к}}}{M}\Delta H_{\text{дг}}. \qquad (8)$$

Отношение $\frac{F}{M}$ можно записать так:

$$\frac{F}{M}=\frac{F}{W\cdot\gamma}=\frac{F}{F\cdot h_{\text{ср}}\cdot\gamma}=\frac{1}{h_{\text{ср}}\cdot\gamma}, \qquad (9)$$

где W, $h_{\text{ср}}$ – объем и средняя толщина слоя СОТС, участвующего в контактном процессе между стружкой и передней поверхностью инструмента;

γ – плотность СОТС (с учетом кристаллогидрата).

Отношение $\frac{M_{\text{к}}}{M}$ обозначим через n. Тогда дифференциальное уравнение (8) запишется в виде

$$\frac{1}{h_{\text{ср}}\cdot\gamma}\tau(l)\cdot V_{\text{с}}=C\frac{dT}{dt}+\frac{k}{h_{\text{ср}}\cdot\gamma}T+n\Delta H=0, \qquad (10)$$

или

$$\frac{dT}{dt}+\frac{k}{h_{\text{ср}}\cdot\gamma\cdot C}T=\frac{\tau(l)\cdot V_c}{h_{\text{ср}}\cdot\gamma\cdot C}-\frac{n\cdot\Delta H}{C}. \qquad (11)$$

Уравнение (11) – неоднородное линейное дифференциальное уравнение первого порядка, общее решение которого имеет вид [7; 8]:

$$T=\frac{\tau(l)\cdot V_c-h_{\text{ср}}\cdot\gamma\cdot n\cdot\Delta H}{k}+A\cdot\exp\left(-\frac{k}{h_{\text{ср}}\cdot\gamma\cdot C}\cdot t\right), \qquad (12)$$

где A – постоянная интегрирования, значение которой определяется из начальных условий $T = 0$ при $t = 0$

$$A=-\frac{\tau(l)\cdot V_{\text{с}}-h_{\text{ср}}\cdot\gamma\cdot n\cdot\Delta H}{k}. \qquad (13)$$

В окончательном виде решение уравнения (8) можно записать так:

$$T=\frac{\tau(l)\cdot V_c-h_{\text{ср}}\cdot\gamma\cdot n\cdot\Delta H}{k}\left[1-\exp\left(-\frac{k\cdot t}{h_{\text{ср}}\cdot\gamma\cdot C}\right)\right]. \qquad (14)$$

Параметр $\tau_0=\frac{h_{\text{ср}}\cdot\gamma\cdot C}{k}$ – характерное время установления стационарной температуры системы «стружка–инструмент–СОТС».

Решение уравнения (10) для различных значений параметра n представлено на рис. 1.

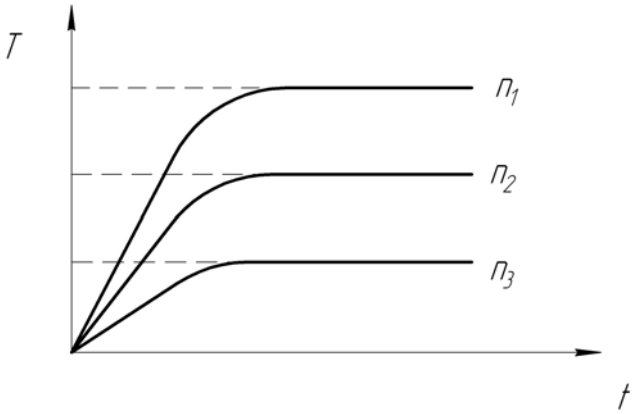

Рис. 1. Температура СОТС в зависимости от времени и параметра $n = M_{\text{к}} / M$.

Рассмотрим изменение энтальпии реальных веществ, которые могут менять свои фазовые состояния и теплоемкость которых зависит от температуры и скачкообразно изменяется в момент фазовых переходов.

В общем виде уравнение для расчета энтальпии реального вещества, имеющего одно фазовое превращение в твердом состоянии, будет следующим [9; 10]:

$$\Delta H_{\text{Т}}=\Delta H_0+\int_0^{T_{\text{пр}}}C_{\text{р}}dT+\Delta H_{\text{г}}\overset{\longleftarrow}{\underset{\longrightarrow}{}}\text{дг}, \qquad (15)$$

где ΔH_0 – энтальпия ЭТП при $T = 0$ К;

$\Delta H_{\text{г}}\overset{\longleftarrow}{\underset{\longrightarrow}{}}$ дг – энтальпия перехода моля ЭТП к СОТС из гидрированного состояния (г) в дегидрированное состояние (дг) равно скачку энтальпии ΔH в формуле (2);

$C_{\text{р}}^{(\text{г})}$ – молярная теплоемкость вещества присадки в СОТС в гидрированном состоянии.

Изменение энтальпии ЭТП (кристаллогидратов) в зависимости от температуры СОТС схематично показано на рис. 2.

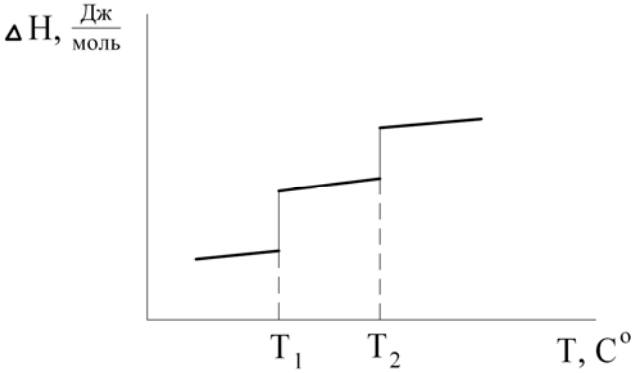

Рис. 2. Изменение энтальпии ЭТП (кристаллогидрата) в зависимости от температуры СОТС: T_1 и T_2 – пороговые температуры различных уровней дегидратации.

Решение уравнения теплового баланса (10) показывает, что отрицательная часть в коэффициенте ($\tau(l)\cdot V_{\text{с}}-h_{\text{ср}}\cdot\gamma\cdot n\cdot\Delta H$), связанная с дегидратацией присадки, приводит к уменьшению температуры СОТС. Выбор присадок с большим скачком ΔH приводит к усилению эндотермического эффекта.

Рассмотрим качественный анализ теплопередачи через прослойку СОТС (рис. 3). В зависимости от толщины этой прослойки процесс может протекать с участием или без участия конвекции. При относительно небольшой толщине прослойки конвекция не развивается, и передача тепла от нагретой поверхности инструмента или детали к холодной поверхности идет только путем теплопроводности (как в твердых телах). При большой толщине прослойки в процессе теплопередачи участвует также и конвек-

ция. При малой толщине прослойки весь градиент температуры сосредоточен в слоях ламинарного движения СОТС, у нагретой и холодной стенок. Причем эти градиенты равны друг другу.

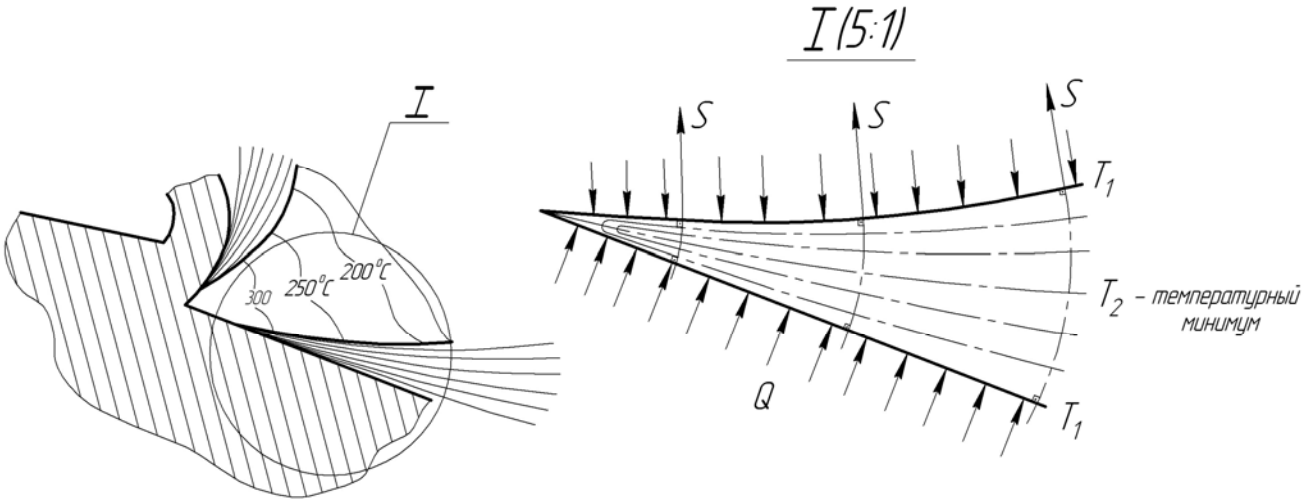

Рис. 3. Оценочные значения изотерм в предположении малой толщины прослойки (в смысле ламинарности) СОТС.

Если обозначить коэффициент теплопроводности через λ, то количество тепла, переданного в единицу времени через прослойку СОТС будет равно:

$$Q = \frac{\lambda F}{h}\left(T_1 - T_2\right), \qquad (16)$$

где F – площадь сечения прослойки, перпендикулярная к направлению распространения тепла;
h – толщина прослойки СОТС;
T_1 и T_2 – значения температур на разных сторонах прослойки.

Согласно формуле (14) можно оценить значение температур в различных частях прослойки СОТС:

$$T = \left(\frac{T_2 - T_1}{h}\right)S + T_1, \qquad (17)$$

где S – координата точек естественной оси, перпендикулярной к изотермам;
T_1 – температура, соответствующая началу координат.

Зная температуры поверхностей инструмента и детали, омываемых СОТС, можно оценить по формуле (17) температуру в точке Y.

Вывод. Получены зависимости изменения энтальпии ЭТП от температуры СОТС и влияния соотношения массы ЭТП к массе масла-матрицы на снижение температуры СОТС в зоне резания.

Для получения более точных количественных результатов в дальнейшем планируется провести численный анализ термодинамического состояния системы «изделие–инструмент–СОТС».

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдулгазис Д. У. Использование эндотермического эффекта дегидратации кристаллогидратов для повышения теплоотводящей способности СОТС на основе растительных масел / Д. У. Абдулгазис // Високі технологи в машинобудуванні : збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків, 2005 – Вип. 2(11). – С. 3–8.
2. Абдулгазис Д. У. Об одной возможности снижения температуры на лезвии резца / Д. У. Абдулгазис, Г. П. Подзноев, Э. Р. Ваниев // Високі технологи в машинобудуванні : збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків, 2004. – Вип. 1(8). – С. 3–7.
3. Абдулгазис Д. У. Композиционные СОТС на основе растительных масел для операций сверления / Д. У. Абдулгазис // Резание и инструмент в технологических системах : межд. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007 – Вып. 73. – С. 3–8.
4. Абдулгазис Д. У. Особенности подачи к режущим кромкам сверла масляных СОТС с присадками, обеспечивающими эндотермический эффект / Д. У. Абдулгазис // Резание и инструмент в технологических системах : межд. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2010 – Вып. 78. – С. 3–6.
5. Резников А. Н. Теплообмен при резании и охлаждение режущих инструментов / А. Н. Резников. – М. : Машгиз, 1963. – 200 с.
6. Якубов Ч. Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием / Ч. Ф. Якубов. – Симферополь : ОАО «Симферопольская городская типография», 2008. – 156 с.
7. Бронштейн И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1964. – 608 с.
8. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1970. – 720 с.
9. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1954. – 296 с.
10. Теория сварочных процессов / [В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров, В. В. Фролов] ; под. ред. В. В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с.