



УДК 539.3/6:519.863

Б.М. Абдеев, Г.Е. Муслиманова, Е.Б. ШестаковаВосточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск**ТОНКОСТЕННЫЙ КОНИЧЕСКИЙ РЕЗЕРВУАР-ВОРОНКА НАИБОЛЬШЕГО ПОЛЕЗНОГО ОБЪЕМА
И МИНИМАЛЬНОЙ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЗАПАСОМ ПРОЧНОСТИ**

В настоящее время чрезвычайно возросли сложность и многофункциональность задач, требующих решения в процессе проектирования. Создание современных машин, механизмов и конструкций качественно нового уровня предполагает использование важнейших достижений фундаментальных наук, применение высокопрочных легких материалов, учет экономических, социальных и экологических факторов [1, 2]. Проблема рационализации несущих элементов проектируемых объектов, в том числе осесимметричных конических оболочек вращения для строительства, авиации, судостроения, нефтегазового хозяйства, химического машиностроения, медицины и социально-бытовых целей, представляет собой целый комплекс актуальных и, вместе с тем, весьма трудоемких задач механики твердого деформируемого тела и теории оптимального управления [3, 4].

Тонкостенные резервуары для хранения жидкостей, сыпучих веществ, газов и т.д. широко применяются в инженерной практике. В то же время сосуды конусообразного профиля (рис. 1) в чистом виде встречаются редко, за исключением бытовых и лабораторных воронок, но в форме конических соединительных деталей между основными частями некоторых конструкций они употребляются довольно часто [5-8].

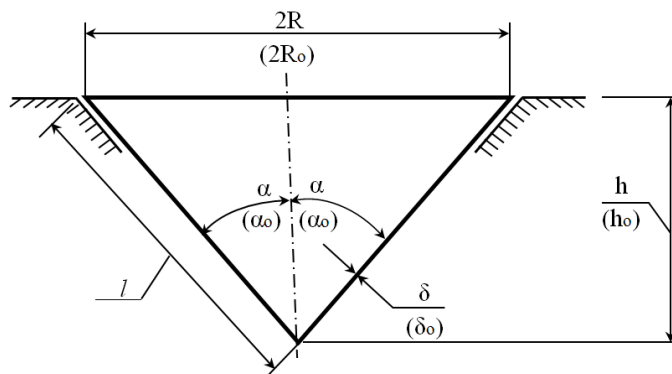


Рисунок 1 - Схематический вид в разрезе конического сосуда для формулировки оптимизационной задачи

Существенной особенностью представленной в данной статье экстремальной задачи является наличие двух целевых функций [4, 9] (рис. 1):

- полезного объема

$$\Pi = \Pi(x_1, x_2) = \frac{\pi}{3} \cdot x_1^2 \cdot x_2, \quad (1)$$

характеризующего вместимость сосуда;

• конструктивно-экономической составляющей V расхода материала на изготовление оболочки

$$V = V(x_1, x_2, x_3) = S(x_1, x_2) \cdot x_3 = \pi \cdot x_3 \cdot x_1 \cdot \sqrt{x_1^2 + x_2^2}, \quad (2)$$

где x_1, x_2, x_3 - варьируемые переменные:

$$x_1 = R > 0, \quad x_2 = h > 0, \quad x_3 = \delta > 0; \quad (3)$$

S - площадь боковой конической поверхности [9]

$$S = S(x_1, x_2) = \pi \cdot x_1 \cdot \sqrt{x_1^2 + x_2^2} > 0. \quad (4)$$

Для удобства и упрощения дальнейших математических выкладок вводим угловой параметр α , используя очевидные геометрические соотношения (рис. 1):

$$x_1 = l \cdot \sin \alpha, \quad x_2 = l \cdot \cos \alpha, \quad (5)$$

где l - заданная длина образующей конуса.

После подстановки (5) в (1) и (2) получаем

$$\Pi = \Pi(\alpha) = \frac{\pi}{3} \cdot l^3 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha; \quad (6)$$

$$V = V(\alpha, x_3) = \pi \cdot l^2 \cdot x_3 \cdot \sin \alpha; \quad (7)$$

$$0 \leq \alpha \leq 90^\circ. \quad (8)$$

В случае использования соотношения (6) имеем обычную классическую задачу на определение абсолютного максимума функции $\Pi(\alpha)$, зависящей от одного аргумента α , изменяющегося в пределах (8). Граничные значения $\alpha=0$ и $\alpha=90^\circ$ не представляют практического интереса, так как дают нулевой объем

$$\Pi(0) = \Pi(90^\circ) = \Pi_{\min} = 0. \quad (9)$$

Записываем для выражения (6) необходимое условие аналитического максимума [4, 9]:

$$\begin{aligned} \left[\frac{d\Pi}{d\alpha} \right]_{\alpha=\alpha_0} &= \frac{\pi}{3} \cdot l^3 (2 \sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0 - \sin^2 \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0) = \\ &= \frac{\pi}{3} \cdot l^3 (2 \cos^2 \alpha_0 - \sin^2 \alpha_0) \cdot \sin \alpha_0 = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Первый корень тригонометрического уравнения (10) $\alpha_{01} = 0$ относится к уже отмеченному неприемлемому нулевому ответу (9), а второе решение следует из алгебраического равенства

$$2 - \operatorname{tg}^2 \alpha_0 = 0, \quad (11)$$

и в результате будем иметь при $\alpha_0 > 0$

$$\operatorname{tg}^2 \alpha_0 = 2, \quad \operatorname{tg} \alpha_0 = \sqrt{2}, \quad \Rightarrow \quad (12)$$

$$\Rightarrow \alpha_0 = 54,74^\circ. \quad (13)$$

Стационарное значение (13) переменной α с учетом (12) удовлетворяет достаточному признаку [9]:

$$\begin{aligned} \left[\frac{d^2 \Pi}{d\alpha^2} \right]_{\alpha=\alpha_0} &= \frac{\pi}{3} \cdot l^3 (2 - 9 \sin^2 \alpha_0) \cdot \cos \alpha_0 = \\ &= \frac{\pi}{3} \cdot l^3 \frac{1}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2 \alpha_0}} \left(2 - \frac{9 \operatorname{tg}^2 \alpha_0}{1+\operatorname{tg}^2 \alpha_0} \right) = -\frac{4\pi l^3}{3\sqrt{3}} < 0, \end{aligned} \quad (14)$$

при котором величина функциональной зависимости (6), определяющая объем Π резервуара, становится наибольшей (см. (12)):

$$\begin{aligned} \Pi_{\max} = \Pi(\alpha_0) &= \frac{\pi}{3} \cdot l^3 \cdot \sin^2 \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0 = \frac{\pi}{3} \cdot l^3 \cdot \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha_0}{1+\operatorname{tg}^2 \alpha_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2 \alpha_0}} = \\ &= \frac{\pi}{3} \cdot l^3 \cdot \frac{2}{3\sqrt{3}} \approx 0,4029 \cdot l^3. \end{aligned} \quad (15)$$

Оптимизированные габаритные размеры конуса $x_{01} = R_0$ и $x_{02} = h_0$ находим по формулам (5), учитывая (12):

$$\left. \begin{aligned} R_0 = x_{01} &= l \cdot \sin \alpha_0 = l \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0,8165 \cdot l; \\ h_0 = x_{02} &= l \cdot \cos \alpha_0 = \frac{l}{\sqrt{3}} \approx 0,5774 \cdot l. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Следует отметить, что количественные результаты (15)-(16) по максимизации функционального критерия (6) адекватны приближенному, но достаточно корректному решению, приведенному в известной книге Перельмана Я.И. [10]:

$$\overline{\Pi_{max}} = 0,4 \cdot l^3, \quad \overline{R_0} = 0,82 \cdot l, \quad \overline{h_0} = 0,57 \cdot l, \quad (17)$$

полученному оригинальным графоаналитическим способом без привлечения необходимого (10) и достаточного (14) признаков [9].

График безразмерной (относительной) целевой зависимости

$$\Pi^* = \Pi^*(\alpha) = 3 \cdot (\pi \cdot l^3)^{-1} \cdot \Pi(\alpha), \quad (18)$$

построенной по формуле (6) в соответствии с информацией таблицы и численными данными (8), (15), представлен на рис. 2.

Расчетные значения зависимости (18)

α , град	0	15	30	45	60	75	90
$\Pi^*(\alpha)$	0	0,0647	0,2165	0,3535	0,3750	0,2416	0

Завершая первую часть экстремальной задачи по исследованию функции (1) (рис. 1, 2), рассмотрим важный, с технологической точки зрения, вопрос изготовления оптимальной конической оболочки-воронки с одним швом путем предварительного вырезания сектора АОВ, имеющего искомый центральный угол β_c , из круга радиуса l (рис. 3).

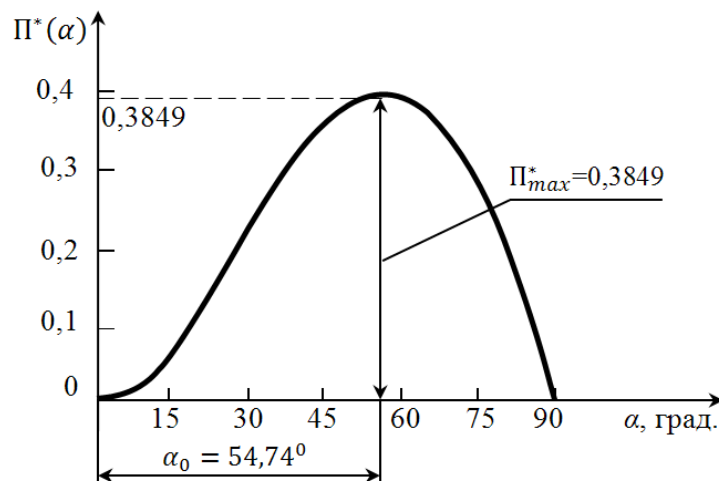


Рисунок 2 – Графическая интерпретация целевого функционального соотношения (18) с учетом (6)

Определяем площади круга $S_{кр}$, боковой поверхности конуса S_o и сектора $AOB = S_c$ (рис. 3) [9]:

$$S_{кр} = \pi \cdot l^2, \quad S_o = \pi \cdot R_o \cdot l = \pi \cdot l^2 \cdot \sin \alpha_o, \quad S_c = \frac{\pi \cdot l^2 \cdot \beta_c}{360^\circ}. \quad (19)$$

Из очевидного геометрического соотношения $S_{кр} - S_o = S_c$, с учетом (12), находим

$$\pi \cdot l^2 - \pi \cdot l^2 \cdot \sin \alpha_o = \frac{\pi \cdot l^2 \cdot \beta_c}{360^\circ}, \quad \Rightarrow \quad (20)$$

$$\Rightarrow \beta_c = 360^\circ (1 - \sin \alpha_o) = 360^\circ \left(1 - \frac{tg \alpha_o}{\sqrt{1 + tg^2 \alpha_o}}\right) = 360^\circ \left(1 - \sqrt{\frac{2}{3}}\right) = 66,06^\circ; \quad (21)$$

в приближенном решении [10] $\overline{\beta_c} = 65^\circ$.

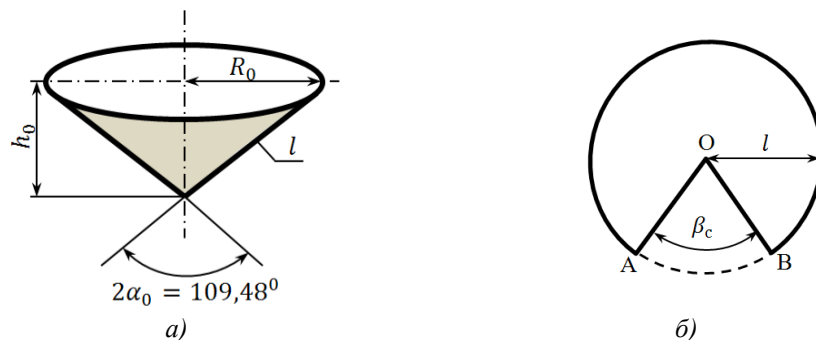


Рисунок 3 – Конический сосуд (а) наибольшего объема Π_{max} (формулы (15), (16)) и листовая заготовка (б) для его изготовления

Для минимизации целевой функциональной зависимости (7) расхода материала

$$V = V(x_3) = \pi \cdot l^2 \cdot x_3 \cdot \sin \alpha_o, \quad x_3 = \delta > 0 \quad (22)$$

с уже известным углом раствора $2\alpha_o$ (рис. 3) вводим дополнительные общепринятые предпосылки – допущения [4-6, 8]:

- материал оболочки с удельным весом γ_m - однородный, сплошной, изотропный и линейно-упругий;

- конструкция находится в безмоментном осесимметричном плоском напряженном состоянии, при котором меридиональное σ_m и кольцевое σ_θ нормальные напряжения будут главными, а третья силовая компонента $\sigma_r = 0$, ввиду тонкостенности оболочки (рис. 4) [8]:

$$\sigma_m = \frac{\gamma_b \cdot tg \alpha_o}{6 \cdot \delta \cdot \cos \alpha_o} (3h_o - 2z) \cdot z + \frac{\gamma_m \cdot z}{2 \cdot \cos^2 \alpha_o}, \quad (23)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\gamma_b \cdot tg \alpha_o}{\delta \cdot \cos \alpha_o} (h_o - z) \cdot z + \gamma_m \cdot z \cdot tg^2 \alpha_o, \quad (24)$$

$$0 \leq z \leq h_o; \quad (25)$$

- резервуар подвешен, то есть имеет свободное опирание по верхнему краю и на 100% заполнен жидкостью или сыпучим веществом при их удельной весовой составляющей, равной γ_b ;

- для обеспечения несущей способности сосуда используем гипотезу Кулона-Сен-Венана (третью теорию прочности) в виде равенства эквивалентного $\sigma_{III} = \max$ и допускаемого $[\sigma]$ напряжений (классическая оптимизация [4]):

$$\sigma_{III} = [\sigma] = \frac{\sigma_T}{[n_T]}, \quad (26)$$

где σ_T - предел текучести материала [8, 11]; $[n_T]$ – нормативный коэффициент запаса [6]

$$[n_T] = 1,3 \div 2,5. \quad (27)$$

С целью упрощения дальнейшего моделирования и расчетов заменяем оптимизированную тригонометрическую характеристику $\cos \alpha_o$ в формулах (23), (24) согласно (12) и [9]:

$$\cos \alpha_o = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2 \alpha_o}} = \frac{1}{\sqrt{3}}. \quad (28)$$

В результате выражения (23), (24) принимают вид:

$$\sigma_m = \frac{\gamma_B \cdot \sqrt{6}}{6 \cdot \delta} \left[z \cdot (3h_o - 2z) + \frac{9 \cdot \gamma_M \cdot \delta}{\gamma_B \cdot \sqrt{6}} \cdot z \right]; \quad (29)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\gamma_B \cdot \sqrt{6}}{\delta} \left[z \cdot (h_o - z) + \frac{2 \cdot \gamma_M \cdot \delta}{\gamma_B \cdot \sqrt{6}} \cdot z \right]. \quad (30)$$

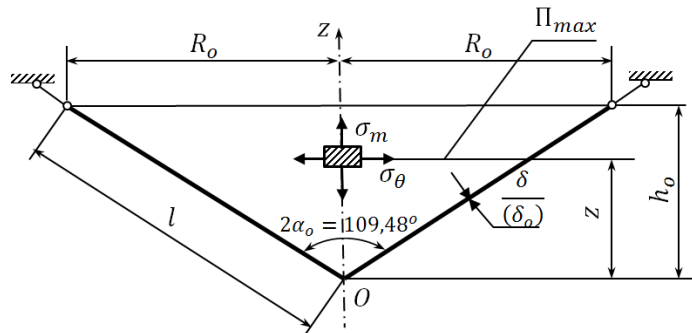


Рисунок 4 – Расчетная модель несущей способности конической оболочки, имеющей оптимальный объем Π_{max} и наибольшее напряжение $\sigma_{III} = \sigma_\theta^{(max)}$

Поскольку подбор минимально допустимой (оптимальной) толщины δ_o необходимо осуществить, применяя теорию наибольших касательных напряжений, когда третья компонента $\sigma_\rho = 0$, а две другие - $\sigma_\theta^{(max)} > \sigma_m^{(max)} > 0$, то в соответствии с [7, 8]

$$\sigma_{III} = \sigma_\theta^{(max)} - \sigma_\rho = \sigma_\theta^{(max)} = \max = [\sigma]. \quad (31)$$

Исходя из условия прочности (31), предварительно находим положение соответствующей точки функциональной зависимости $\sigma_\theta = \sigma_\theta(z)$, базируясь на формуле (30) [9]:

$$\left[\frac{d\sigma_\theta}{dz} \right]_{z=z_o} = 0, \quad \Rightarrow \quad z_\theta = \frac{1}{2} \left(h_o + \frac{\gamma_M \cdot \delta_o}{\gamma_B \cdot \sqrt{6}} \right) \leq h_o. \quad (32)$$

Подставляем (32) в (30) и раскрываем равенство (26), которое, учитывая (31), трансформируется в алгебраическое соотношение:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{III} = \sigma_\theta^{(max)} &= \frac{\sigma_T}{[n_T]}, \quad \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\gamma_B \cdot \sqrt{6}}{\delta_o} \left\{ \frac{1}{2} \left(h_o + \frac{\gamma_M \cdot \delta_o}{\gamma_B \cdot \sqrt{6}} \right) \cdot \left[h_o - \frac{1}{2} \left(h_o + \frac{\gamma_M \cdot \delta_o}{\gamma_B \cdot \sqrt{6}} \right) \right] + \frac{\gamma_M \cdot \delta_o}{\gamma_B \cdot \sqrt{6}} \left(h_o + \frac{\gamma_M \cdot \delta_o}{\gamma_B \cdot \sqrt{6}} \right) \right\} &= \frac{\sigma_T}{[n_T]} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Дальнейшие расчеты проще и эффективнее производить в численном виде. Поэтому в качестве конкретного примера рассмотрим конический сосуд из листовой качественной стали марки 20 с пределом текучести $\sigma_T = 2500 \text{ кГ/см}^2$, коэффициентом запаса $[n_T] = 2$ и удельным весом $\gamma_M = 7820 \cdot 10^{-6} \text{ кГ/см}^3$ [6, 8, 11] при длине образующей $l = 10 \text{ м} = 1000 \text{ см}$ (рис. 1, 3). Резервуар залит минеральным маслом, имеющим плотность $\gamma_B = 900 \cdot 10^{-6} \text{ кГ/см}^3$ [7, 11].

Руководствуясь выведенными формулами (15)-(16), находим оптимизированные линейные размеры R_o , h_o и максимальный полезный объем Π_{max} воронки (рис. 3, 4):

$$\left. \begin{aligned} R_o &= 0,8165 \cdot l = 0,8165 \cdot 1000 = 816,5 \text{ см;} \\ h_o &= 0,5774 \cdot l = 0,5774 \cdot 1000 = 577,4 \text{ см;} \\ \Pi_{max} &= 0,4029 \cdot l^3 = 402,9 \text{ м}^3 = 402,9 \cdot 10^6 \text{ см}^3. \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Преобразуем предельное условие несущей способности (33) в квадратное уравнение относительно минимально допустимого параметра δ_o , подставляя в (33) количественные исходные данные (см. выше) и результаты расчета (34), =>

$$\delta_o^2 - 59865,6 \cdot \delta_o + 8832 = 0. \quad (35)$$

Учитывая, что искомое значение $\delta_o \ll l$, из решения (35) получаем:

$$\left. \begin{aligned} \delta_o &= 29932,8 - \sqrt{(29932,8)^2 - 8832}, \Rightarrow \\ \Rightarrow \delta_o &= 0,1475 \text{ см} \approx 0,15 \text{ см} \approx 1,5 \text{ мм.} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

И наконец, по формулам (22) и (32) при $x_3 \Rightarrow x_{o3} = \delta_o$, $\alpha_o = 54,74^\circ$, находим наименьший теоретический объем V_{min} материала оболочки и стационарную координату $z_{\theta o}$, соответствующую максимальному напряжению $\sigma_{III} = [\sigma] = 1250 \text{ кг/см}^2$:

$$V_{min} = V(x_{o3}) = \pi \cdot l^2 \cdot \delta_o \cdot \sin \alpha_o = 3,14 \cdot 1^2 \cdot 0,0015 \cdot \sin 54,74^\circ = \quad (37)$$

$$= 0,003846 \text{ м}^3 = 3846 \text{ см}^3;$$

$$z_{\theta o} = \frac{1}{2} \left(h_o + \frac{\gamma_m \cdot \delta_o}{\gamma_b \cdot \sqrt{6}} \right) = 0,5 \left(577,4 + \frac{7820}{900} \cdot \frac{0,15}{\sqrt{6}} \right) = 289 \text{ см.} \quad (38)$$

Можно также отметить, что требуемую по условию прочности расчетную толщину стенки δ_o резервуара, как правило, увеличивают на $1,5 \div 2,5 \text{ мм}$ с учетом ее возможного ослабления в результате коррозии [7, 11, 12].

Полученные в данной научно-исследовательской работе результаты позволяют сделать следующие выводы:

1) поставленная механико-математическая прикладная задача решена в замкнутом виде классическим аналитическим способом, в котором строго доказано, что функциональные критерии Π и V действительно имеют относительные экстремумы Π_{max} и V_{min} , соответствующие наибольшей вместимости резервуара и минимальному расходу материала при изготовлении конической оболочки;

2) разработанная точная математическая модель процесса оптимизации, включающая три уравнения связи, доведена до расчетных формул рациональных геометрических параметров и проиллюстрирована численным примером;

3) представленную методику оптимального проектирования, возможно, модифицировать и обобщить на усеченные конусообразные емкости, которые находят применение в различных отраслях техники не только как сосуды для жидких и сыпучих веществ, но и в качестве сопрягающих элементов комбинированных резервуаров и специальных конструкций сложной формы.

Список литературы

1. Рейклейтис П. Оптимизация в технике / П. Рейклейтис, А.А. Рейвиндран, К. Рэкседл: - В 2-х кн. - Кн. 1 / Пер. с англ. В.Я. Алтаева, В.И. Моторина. - М.: Мир, 1986. - 351 с.
2. Фролов К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения. - М.: Машиностроение, 1984. - 224 с.
3. Филин Л.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. - М.: Наука, 1975. - Т. 1. - 832 с.
4. Лесин В.В. Основы методов оптимизации / В.В. Лесин, Ю.П. Лисовец. - М.: Изд-во МАИ, 1998. - 344 с.
5. Татур Г.К. Общий курс сопротивления материалов. - Минск: Изд-во «Вышэйшая школа», 1974. - 464 с.
6. Биргер И.А. Сопротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. - М.: Наука, 1986. - 560 с.
7. Ицкович Г.М.. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов: Учеб. пособ. для вузов / Г.М. Ицкович, Л.С. Минин, А.И. Виноградов / Под ред. Л.С. Минина. - 3-е изд. перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 2001. - 592 с.
8. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. - Киев: Изд-во «Наукова думка», 1975. - 704 с.
9. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. - М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. - 608 с.
10. Перельман Я.И. Занимательная алгебра. - М.: Наука, 1967. - 200 с.
11. Сафарян М.К. Металлические резервуары и газгольдеры. - М.: Недра, 1987. - 200 с.
12. Любошиц М.И. Справочник по сопротивлению материалов / М.И. Любошиц, Г.М. Ицкович. - Минск: Изд-во «Вышэйшая школа», 1969. - 464 с.

Получено 20.07.2016

УДК 69.002.5 + 666.97.031+691:658.274+666.1/.5

Г.А. Гурьянов, М.В. Дудкин, А.В. Вавилов, О.Ю. Васильева, А.И. Ким

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск

**АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУТЕЙ И СПОСОБОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ДРОБИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Дробление является основным процессом при производстве различных материалов и широко используется в различных отраслях промышленности [1-10] для измельчения различных руд, осадочных и вулканических пород, шлаков и клинкера, резины, полимеров, угля, древесины и многого другого. Проблемы измельчения материалов остро стоят перед предприятиями горнорудной и химической промышленности, строительной отрасли и сельского хозяйства. Именно агрегаты измельчения позволяют грамотно и с наибольшей достижимой на данный момент отдачей использовать природные ресурсы.

В связи с различными физико-механическими характеристиками перерабатываемого материала, а также разными требованиями к конечному продукту, выпускаются самые разнообразные дробильные машины: щековые, конусные, валковые, роторные, молотковые и другие виды дробилок [11-16]. При отсутствии отечественных аналогов измельчительных машин необходимо создавать производство такой техники, обеспечивающей качественное измельчение материала и обладающей при этом выгодными техническими характеристиками, которая могла бы составить конкуренцию зарубежным аналогам.

Целью данной статьи является определение путей повышения эффективности процессов дробления и совершенствования отдельных видов дробильного оборудования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи исследований:

1. Провести изучение и анализ современного состояния технологии крупного измельчения и существующих способов и машин для дробления материалов.
2. Выявить достоинства и недостатки машин для дробления материалов и протекающих в них процессов.
3. Определить виды дробильного оборудования, с одной стороны, более других нуждающиеся в совершенствовании, а с другой - позволяющие кардинально изменить технологические процессы (схемы) дробления при улучшении технических, технологических и экономических показателей.
4. Определить основные пути совершенствования рабочего процесса и конструкции выбранного дробильного оборудования.

Цель и задачи определили характер, структуру и объем исследований, проводимых в рамках выполнения работы по гранту КН МОН РК №53-210-15 - №60-210-13 «Технология дробления и сортировки с использованием новых способов обработки сыпучих материалов».

В результате изучения состояния вопроса исследований [16-25] установлено следующее.

Работы по обновлению парка дробильных машин проводятся с учетом последних достижений в этой отрасли машиностроения. Анализ многочисленных конструкций дробильных машин, выпущенных за последнее время в разных странах, показывает, что общей тенденцией их развития следует считать повышение технико-экономических показателей, надежности и удобства обслуживания машин.

Посещение выставок «Строительная техника и технологии 2014», «Строительная техника и технологии 2015» (г. Москва, РФ), «Kazbuild-2015» (г. Алматы), «MachExpo

Kazakhstan 2015» (г. Астана) и других позволило установить следующие важные тенденции в современном дробильном оборудовании:

- производителями предлагаются в абсолютном большинстве щековые, конусные и роторные дробилки, и в меньшей степени - центробежно-ударные и молотковые;

- в конструкциях дробилок разных производителей существенных отличий мало, основные отличия продукции одних производителей от других заключаются в используемых материалах, в частности для дробящих поверхностей - в большем или меньшем использовании гидропривода, в конструкции регулировочных и других вспомогательных механизмов и т. д.;

- никто из производителей не предлагает дробильных машин, которые бы имели принципиальные конструктивные или иные технические и технологические отличия инновационного характера, переводящие процесс дробления на новый, более высокий уровень, существенно отличающий их от аналогов, например в плане снижения энергоемкости дробления, получения более качественного готового продукта, возможности измельчать более прочный материал при меньшей мощности и т. д., либо эти отличия тщательно скрываются как know-how;

- производителями практически не предлагаются валковые дробилки, так как считается, что они имеют слишком много недостатков и могут применяться весьма ограниченно, а именно только для материалов низкой прочности (например для угля) и при малом размере исходных кусков.

Из этого следует два важных вывода, определяющих стратегию дальнейших исследований по совершенствованию дробильного оборудования:

1. Совершенствование дробильных машин, вне зависимости от конструкции, должно идти по пути получения таких решений конструктивного или технологического характера, которые бы сразу поднимали совершенствуемую дробильную машину, по сравнению со всеми аналогичными, на более высокий уровень; наиболее перспективным и комплексным показателем с этой точки зрения является снижение энергоемкости дробления.

2. Особое внимание следует уделить совершенствованию и развитию валковых дробилок, используя заложенные в них преимущества и избавляя их от недостатков так, чтобы валковые дробилки могли составить конкуренцию щековым и конусным дробилкам, хотя бы и в отдельных областях.

При изучении материалов, собранных на выставках, а также источников [1-25] и других было установлено следующее.

Последние достижения в области общего машиностроения, например подшипниковой промышленности, конструкций гидравлических и пневматических систем, износостойких сталей, резинотехнических и синтетических материалов, оказали большое влияние на совершенствование дробильных машин.

Так, применительно к щековым дробилкам эти достижения позволили:

- улучшить технико-эксплуатационную характеристику машин путем повышения частоты вращения эксцентрикового вала;

- по-новому оценить возможности основных кинематических схем, а именно на основе применения новых крупных подшипников качения, выдерживающих большие динамические нагрузки, а также на основе повышения износостойкости дробящих плит перейти на выпуск менее металлоемких дробилок со сложным движением щеки самых больших типоразмеров, превышающих размеры дробилок с простым движением и применяющихся вместо них для первичного дробления;

- применить различные неломающиеся предохранители конструкций дробилок от поломки при превышении допустимых нагрузок;

– создать конструкцию щековой дробилки с опорой подвижной щеки на гидросистему, во-первых, для обеспечения пропуска недробимого тела не только без поломки деталей дробилки, но вообще без остановки процесса дробления, а во-вторых, для обеспечения дистанционного, плавного регулирования выходной щели, возможности запуска под завалом, предохранения от перегрузок (что, вообще говоря, может служить нечастым примером более-менее существенного изменения конструкции, оказывающего влияние на процесс измельчения);

– применить решение опоры неподвижной дробящей плиты не непосредственно на стенку станины, а на промежуточную плиту различной толщины, что позволяет при изменении размера щели сохранить угол захвата и тем самым обеспечить оптимальные условия для процесса дробления.

В производстве конусных дробилок зарубежные фирмы большое внимание уделяют созданию модификаций дробилок одного типоразмера с различными профилями камеры дробления и с различной величиной угла трения подвижного конуса, что дает возможность эффективно использовать дробилки в самых различных условиях эксплуатации. Так же широко, как и в щековых, в конусных дробилках для регулирования размеров выходной щели и в качестве амортизационных устройств используются гидравлические и гидропневматические системы, а механизм эксцентрикового привода для улучшения конструкции и повышения надежности переводится на подшипники качения (что, в общем, не является оригинальным).

В целом можно отметить, что после применения для конусных и щековых дробилок инерционного вибропривода, существенно повлиявшего на физику процесса измельчения, энергоемкость процесса и характеристики готового продукта, существенных технических решений подобного уровня больше не предлагалось.

Развитие конструкций роторных дробилок идет в основном в направлении создания:

- дробилок больших типоразмеров (для исходных кусков более 1000 мм);
- легкозаменяемых бил с коэффициентом использования более 70%, процессом крепления которых к ротору можно управлять с пульта оператора через пневмо- и гидросистемы зажима;
- корпусов дробилок, имеющих удобные разъемы, снабженных устройствами для открывания и закрывания;
- привода дробилки с плавным регулированием частоты вращения ротора и торможением ротора при остановке;
- дробилок мелкого дробления с применением отражательных плит с горизонтальными колосниками, частично охватывающими нижнюю половину ротора.

Таким образом, исходя из результатов проведенного анализа и полученных выводов, можно заключить следующее.

Во-первых, из множества разновидностей дробильного оборудования особое внимание следует уделить валковым дробилкам, наименее представленным на рынке и, по мнению потребителей и производителей, обладающим слишком большим количеством недостатков, ограничивающих их применение. Именно в сфере совершенствования валковых дробилок потенциально возможен прорыв в конструкциях и технологиях. Также определенное внимание следует уделить щековым дробилкам, имеющим наиболее широкое применение и наибольшую универсальность, с одной стороны, с целью переноса применяемых в них новых технических решений на другие конструкции, в частности на валковые дробилки, а также с целью дальнейшего расширения их возможностей.

Во-вторых, основными способами совершенствования дробильных машин вообще и отмеченных выше в частности и повышения эффективности процесса измельчения в це-

лом, определяющими стратегию работы по совершенствованию дробильных машин, в общем случае могут быть:

- применение многостадийного дробления;
- применение технологии вибрационного воздействия на измельчаемый материал;
- использование внутренних скрытых ресурсов конструкции машины;
- изменение традиционной формы и взаимного расположения рабочих органов дробилок;
- более рациональное использование пространства камеры дробления для увеличения производительности, частоты движений дробящего органа и снижения динамических нагрузок на опорные узлы дробилки;
- изменение геометрических и кинематических параметров дробильного оборудования;
- увеличение количества и разнообразия воздействий на измельчаемый материал в единицу времени, сокращение времени и энергозатрат на дробление, применение дополнительного воздействия на материал, снижение необходимого количества воздействий на материал до его разрушения;
- объединение двух различных по конструкции дробилок в одном агрегате в виде двух независимых ступеней – агрегатов с возможностью изменения их взаимного расположения, независимого ремонта, а также совершенствования одной части конструкции независимо от другой;
- создание и внедрение новых прогрессивных способов измельчения на основе рационального сочетания существующих способов, дополненных использованием внутренних скрытых ресурсов конструкции дробилки.

При этом основным определяющим направлением исследований, затрагивающим в той или иной мере все остальные, является повышение производительности дробилок и прочности измельчаемого материала при снижении энергозатрат на измельчение. Опираясь на полученные результаты, можно целенаправленно вести работу по созданию и совершенствованию конструкций разнообразного дробильного оборудования.

Итак, можно сделать следующие выводы.

1. В результате проведенных исследований и анализа современного состояния технологии крупного измельчения и существующих способов и машин для дробления материалов выявлено, что общей тенденцией их развития следует считать повышение технико-экономических показателей, надежности и удобства обслуживания машин.
2. В настоящее время производителями предлагаются в абсолютном большинстве щековые, конусные и роторные дробилки. Никто из производителей не предлагает дробильных машин, которые бы имели принципиальные конструктивные или иные технические и технологические отличия инновационного характера, существенно отличающие их от аналогов. Производителями практически не предлагаются валковые дробилки, так как считается, что они имеют слишком много недостатков и весьма ограниченное применение.
3. Разработана стратегия дальнейших исследований: получение таких решений конструктивного или технологического характера, которые бы поднимали совершенствуемую дробильную машину на более высокий уровень по сравнению с аналогичными; особое внимание следует уделить совершенствованию и развитию валковых дробилок.
4. Предложены основные обобщенные направления совершенствования дробильных машин и повышения эффективности процесса измельчения.
5. Разработанные способы совершенствования позволяют создавать принципиально новые конкурентоспособные дробильные машины со значительно улучшенными параметрами.

Список литературы

1. Акунов В.И. Анализ современной дробильной техники и её развития. – М.: Машиностроение, 2004. – 230 с.
2. Жуков В.П. Пути повышения качества нерудных материалов // Промышленность строительных материалов Москвы: Реф. сб. – 1996. – № 6. – С. 17-20.
3. Демидов А.Р. Способы измельчения и оценка их эффективности / А.Р. Демидов, С.Е. Чирков. – М.: ЦИНТИ, 2009. – 49 с.
4. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 2007. – 368 с.
5. Синельникова Л.Н. Методы дробления и измельчения руд за рубежом. – М.: ЦНИИТЭИцветмет, 2003. – 29 с.
6. Пухаренко Ю.В. Применение отходов камнедробления в бетонах / Ю.В. Пухаренко, С.Н. Панарин, С.И. Веселова и др. // Технологии бетонов. – 2013. – № 11. – С. 34-35.
7. Журавлев А.А. Состояние промышленности нерудных материалов и перспективы её развития // Строительные материалы. – 2007. – № 11. – С. 4-6.
8. Дубов В.А. Технология и оборудование для эффективной переработки осадочных горных пород / В.А. Дубов, Н.В. Солодков // Строительные материалы. – 2008. – № 5. – С. 26-27.
9. Лоскутов А.В. Комплекс оборудования ОАО НИИПроектабест для производства заполнителей бетонных и растворных смесей / А.В. Лоскутов, В.Н. Сапрыкин // Технологии бетонов. – 2013. – № 11. – С. 20-22.
10. Петрова Е.В. Взгляд в будущее – обзор новинок, представленных на выставке ConExpo-Con/Agg // Строительная техника и технологии. – 2014. – № 3 (103). – С. 30-48.
11. Каталог оборудования для работы с сыпучими материалами. – Тула: Строймеханика, 2014. – 57 с.
12. Маркетинговое исследование рынка грохотов и дробильного оборудования, 2010-2011 гг., прогноз до 2014 г. – AS MARKETING. – 2012. – 75 с.
13. Велецкий Б.Ф. Строительные машины и оборудование: Справ. пособие. – Ростов н/Д, 2002. – 592 с.
14. Строительные машины: Справ. – В 2 т. / Под общ. ред. Т.1 – Э.Н. Кузина, Т.2 – М.Н. Горбовца. – М.: Машиностроение, 1991.
15. Мартынов В.Д. Строительные машины и монтажное оборудование. Учеб. для студентов вузов / В.Д. Мартынов и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
16. Дорожно-строительные машины и комплексы: Учеб. для вузов / Под общ. ред. В.И. Бабловнева. – 2-е изд. доп. и перераб. – М.; Омск: Изд-во СибаДИ, 2001. – 528 с.
17. Менькин Р.Ю. Щековые дробилки нового поколения // Горная промышленность, 2004. – № 3.
18. Гийо Р. Проблема измельчения материалов и её развитие. – М.: Стройиздат, 2004. – 112 с.
19. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. – М.: Недра, 2001. – 343 с.
20. Вердяян М.А. Процессы измельчения твёрдых тел / М.А. Вердяян, В.В. Каферов // Процессы и аппараты химической технологии. – М., 2007. – Т. 5. – С. 5-89.
21. Лагунова Ю.А. Эффективность молотковых дробилок / Ю.А. Лагунова, О.М. Бруслова // Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). – 2012. – № 1. – С. 3-6.
22. Лагунова Ю.А. Увеличение срока службы молотковых дробилок / Ю.А. Лагунова, О.М. Бруслова, В.И. Сайтов // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 74-77.
23. Бруслова О.М. Модернизация конструкции молотковой дробилки // Вестн. науки Костанайского соц.-техн. ин-та: Сер. естеств.-техн. наук. – Костанай: Изд-во КСТУ. – 2009. – № 1. – С. 56-61.
24. drobilko.ru – информационно-справочный портал о дробильном оборудовании и технике. – Москва, 2015.
25. spbspart.com – официальный сайт дилера по продаже дробильного оборудования.

Получено 26.07.2016

УДК 69.002.5 + 666.97.031+691:658.274+666.1/5

Г.А. Гурьянов, М.В. Дудкин, А.В. Вавилов, О.Ю. Васильева, А.И. Ким

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск

**РАЗРАБОТКА НОВОЙ РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ ВАЛКОВ ВАЛКОВЫХ ДРОБИЛОК
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ**

На основании ранее проведенного анализа было установлено, что из множества разновидностей дробильного оборудования особое внимание следует уделить валковым дро-

билкам, как наименее представленным на рынке и (по мнению потребителей и производителей) обладающим слишком большим количеством недостатков, ограничивающих их применение. Именно в сфере совершенствования валковых дробилок потенциально возможен прорыв в конструкциях и технологиях.

В статье изложены результаты, полученные, в том числе, при выполнении работы по гранту КН МОН РК №53-210-15 - № 60-210-13 «Технология дробления и сортировки с использованием новых способов обработки сыпучих материалов».

Валковые дробилки предназначены для мелкого и среднего дробления пород средней и низкой прочности [1-4]. Основным рабочим элементом валковых дробилок традиционной конструкции является вращающийся на горизонтальной оси цилиндрический валок. Исходный материал подается сверху, затягивается между валками или между валком и футеровкой камеры дробления и в результате этого измельчается. Поверхности валков могут быть гладкими, рифлеными и зубчатыми.

Общими преимуществами валковых дробилок являются: простота конструкции и эксплуатации, надежность работы, низкий удельный расход энергии и низкая удельная масса (металлоемкость), способность перерабатывать материалы, склонные к налипанию, возможность получения мелкодисперсного материала путем истирания.

Для валковых дробилок следует отметить, что практикой их эксплуатации установлены следующие недостатки, снижающие эффективность их использования: ограниченный угол захвата; ограниченный максимальный размер захватываемых кусков материала; низкая степень измельчения; относительно невысокие дробящие усилия; относительно невысокая производительность; большие относительно размеров исходного материала размеры и масса; низкое качество готового продукта по гранулометрическому составу и форме зерен.

При этом анализом установлено, что в первую очередь следует направить усилия на устранение следующих недостатков: во-первых, это ограниченный угол захвата, являющийся, в свою очередь, причиной проявления других вышеперечисленных недостатков, а во-вторых, низкое качество готового продукта по гранулометрическому составу и форме зерен.

Базируясь на сделанных выводах и на основании изучения конструкций валковых дробилок [1-6], а также анализа их недостатков, для устранения недостатков и получения принципиально новой конструкции валковой дробилки необходимо решить следующие задачи:

- улучшить захват материала гладкими валками до эффективности такой же, как у рифленых или даже зубчатых валков;
- уменьшить соотношение между размером гладкого валка и максимального куска исходного материала до значения 4...5 и менее (против 17...20 у серийных дробилок);
- уменьшить в 3...4 раза или более диаметр валков, а следовательно, уменьшить размеры и металлоемкость дробилки в целом;
- повысить степень измельчения материала до значения, равного 6...8 (против 2...4 у серийных дробилок с гладкими валками);
- снизить неравномерность готового продукта по крупности;
- повысить частоту вращения валков и, следовательно, повысить производительность дробилки.

Очевидно, что поставленные задачи могут быть решены за счет разработки новых рабочих органов валковой дробилки - валков. Разработку новых валков будем вести, опираясь на предложенные нами способы совершенствования дробильных машин и повышения эффективности процесса измельчения, а именно: использование внутренних ресурсов

конструкции машины; изменение традиционной формы рабочих органов; изменение геометрических и кинематических параметров рабочих органов.

Для определения направления разработки новых валков предварительно оценим перспективы развития рабочих органов валковых дробилок.

Чтобы улучшить захват кусков материала, нужно увеличить угол захвата дробилки. Из простого анализа схемы захвата кусков валковой дробилкой [2-4] видно, что угол захвата увеличивается при увеличении диаметра валка. Однако это увеличивает размеры, массу и металлоемкость дробилки. Поэтому надо искать иные способы увеличения угла захвата.

Исходя из приведенных выше способов совершенствования дробилок, можно предложить решать подобную проблему путем перехода от традиционной цилиндрической формы валков к иной форме, в т. ч. в сочетании с новой их кинематикой. Так, существуют дробилки, в которых угол захвата увеличивается за счет уменьшения кривизны поверхности валков при сохранении их размеров. Такой формой валков является предлагаемый разными авторами равноосный в поперечном сечении контур валков в виде равностороннего треугольника с выпуклыми гранями и скругленными вершинами. Схема такой двухвалковой дробилки приведена на рис. 1 (Патент СССР №880466). Применение валков, имеющих в поперечном сечении равноосный контур, увеличивает условный радиус валка, а значит, позволяет повысить угол захвата валковой дробилки и надежность захвата кусков материала, уменьшить истирающий эффект при измельчении материала и уменьшить износ рабочей поверхности валков, в результате чего увеличивается срок службы валков и повышается производительность валковой дробилки при минимальном увеличении энергозатрат. При одинаковой кривизне рабочих поверхностей размеры поперечного сечения валков в предлагаемой конструкции дробилки примерно в два раза меньше, чем в обычных валковых дробилках.

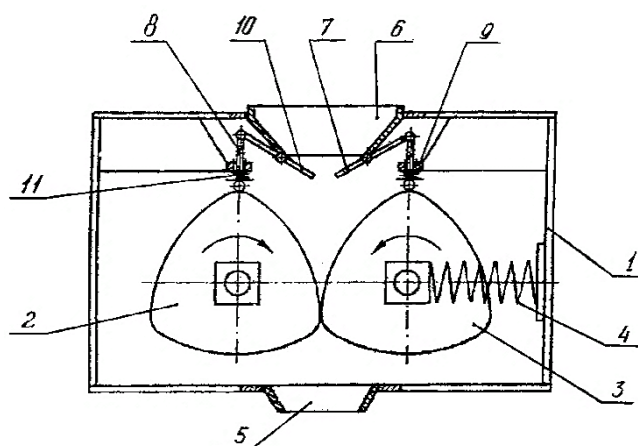


Рисунок 1 - Валковая дробилка с треугольными валками: 1 - корпус; 2,3 - валки; 4,11 - пружины; 5 - разгрузочная воронка; 6 - загрузочная воронка; 7,10 - шибера; 8 - толкатели; 9 - направляющие

Однако данная дробилка, имеющая традиционный привод вращения валков, отличается неравномерностью контакта дробящих поверхностей на выпуклых гранях и на вершинах треугольника, т. е. переменными динамическими нагрузками.

Устранить этот недостаток, а также уменьшить габариты и массу дробилки можно за счет применения принципиально нового планетарно-роторного движения (ПРД) валков [7, 8]. Такая дробилка, разработанная профессором Ли С.В., приведена на рис. 2.

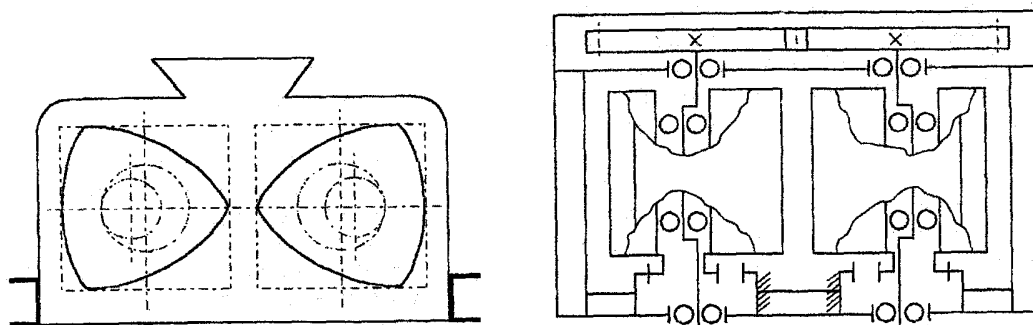


Рисунок 2 - Дробилка с ПРД валков: 1 - спутник; 2 - центральное зубчатое колесо; 3 - эксцентровый вал

В дробилке с ПРД валков применяются валки, имеющие практически тот же равноосный в поперечном сечении контур в виде равносностороннего треугольника (образованный гипотрохоидой), и, благодаря планетарной передаче, простое вращательное движение вала преобразуется в сложное движение наружных поверхностей плит валка, обеспечивая постоянный зазор между поверхностями обоих валков.

Криволинейная форма дробящих плит и планетарное движение валков позволяют создать значительные удельные давления на куски материала в зоне дробления, что улучшает условия для их разрушения. Таким образом, по своему устройству дробилка с ПРД рабочего органа приближается к устройству обычной валковой дробилки, а по принципу действия - к щековой.

Основными ее недостатками являются: сложность получения требуемой формы валков, сложность привода валков, повышенная мощность. Общим недостатком для дробилок, имеющих равноосный профиль валков, является низкое качество готового продукта по гранулометрическому составу и форме зерен, т. к. кусок материала находится с рабочими поверхностями таких валков в точечном контакте. Других предложений по применению валков нетрадиционной, отличной от окружности, формы в процессе обзора и анализа современного состояния рабочих органов валковых дробилок обнаружено не было.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать вывод, что перспективным в плане повышения эффективности валковых дробилок может являться применение их рабочих органов (валков), имеющих форму, отличную от цилиндрической (окружности в сечении). При этом форма валков, выполненных в виде правильного многоугольника, образованного пересечением окружностей дуг большого радиуса и малой кривизны, не является оптимальной по причине сложности получения подобной формы и необходимости обязательного применения сложного нетрадиционного привода для получения равномерного процесса дробления.

На основании сделанного анализа с целью устранения недостатков и реализации вышеперечисленных улучшений показателей работы дробилки дальнейшую работу следует вести в направлении разработки новой рациональной формы валков, которая бы позволила устранить большинство недостатков и добиться большинства из необходимых улучшений показателей работы и при этом не имела бы (или не создавала бы) новых недостатков.

Положительный результат этой работы позволит создать принципиально новую по своим показателям валковую дробилку со значительно улучшенными параметрами, которая сможет составить конкуренцию продукции других производителей на внутреннем и внешнем рынке.

Рассмотрим два варианта конструктивных схем валковой дробилки: одновалковую (рис. 3,а) и двухвалковую (рис. 3,б). Из сравнения этих двух схем видно, что одновалковая дробилка имеет больший угол захвата и большую степень измельчения, имеет зону параллельности поверхностей рабочей камеры, а значит, позволяет получать более качественный продукт. Однако ее недостатком является то, что вторая поверхность, образующая камеру дробления, неподвижна, и куски дробимого материала при движении в камере испытывают большие сопротивления от трения, которые тем больше, чем больше степень измельчения, т. е. сжатие. Исходя из этого и принимая за основу одновалковую дробилку, разработаем валок дробилки новой рациональной формы. При этом необходимо устранить вышеуказанный недостаток одновалковой дробилки, т. е. выполнить обе дробящие поверхности, образующие камеру дробления, подвижными (вращающимися).

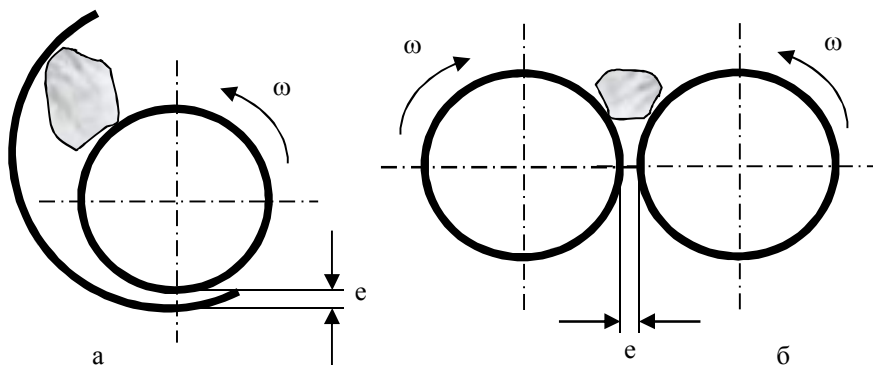


Рисунок 3 - Схемы валковых дробилок

Решая поставленную задачу, пришли к выводу, что форма валка, отличная от цилиндрической, в общем случае должна образовываться следующим образом [9-12]. Форма поперечного сечения каждого валка образуется не менее чем двумя окружностями одинакового радиуса R , которые касаются друг друга и, для того, чтобы обеспечить зону параллельности в месте дробления материала, сопряжены окружностями с радиусом R . В результате получаем валки выпукло-вогнутой формы (ВВФ), которые можно также назвать *полицилиндрическими*, поскольку их основу составляют несколько (не менее двух) цилиндров.

Несложный сравнительный анализ возможных форм валков в зависимости от количества образующих окружностей показывает, что, во-первых, целесообразно применять валки, образованные тремя или большим количеством окружностей, а, во-вторых, т. к. при увеличении количества образующих окружностей форма валка стремится к цилиндрической, то и угол захвата при этом уменьшается, как и возможности валка по захвату кусков, обеспечению высокой степени дробления и т. д.

Для осуществления процесса дробления парой валков новой выпукло-вогнутой формы при их установке в дробилке необходимо повернуть один валок относительно другого на 60° или 45° в зависимости от количества образующих окружностей. Схемы установки парных полицилиндрических валков ВВФ, образованных тремя и четырьмя окружностями, приведены на рис. 4.

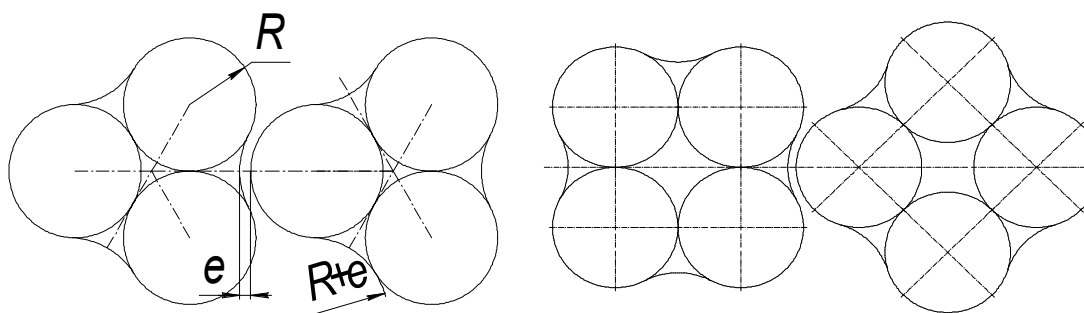


Рисунок 4 – Валки новой формы

Далее проведем моделирование работы дробилки с полицилиндрическими валками ВВФ [13, 14].

Для предварительного определения геометрических размеров валков ВВФ проведем плоское моделирование в графической программе КОМПАС, приняв за исходные параметры максимальный размер куска дробимого материала (D_{\max}) и угол захвата $\alpha/2$. Определим наибольшую степень измельчения i , а также минимальное соотношение диаметра всего валка D к диаметру измельчаемого куска D_{\max} (т. е. D/D_{\max}).

Предварительно эмпирическим путем было выяснено, что наиболее приемлемое соотношение $e/R \approx 0,15$. При увеличении этого числа уменьшается степень измельчения, а при уменьшении - происходит заедание валков.

Задавшись максимальным размером куска исходного материала $D_{\max} = 300$ мм, сконструируем валки по трем окружностям (рис. 5). Задача состоит в том, чтобы обеспечить для данного размера куска требуемый угол захвата не менее 18 градусов и оценить при этом полученную степень измельчения i и размеры валка D .

Приняв исходное положение валков, моделируем поворот валков сначала с шагом в 5 градусов, затем, уменьшая шаг, получаем при повороте валков на угол 24 градуса угол захвата $\alpha/2$, равный 18 градусов (рис. 5). В данном положении захватывается кусок наибольшего возможного размера.

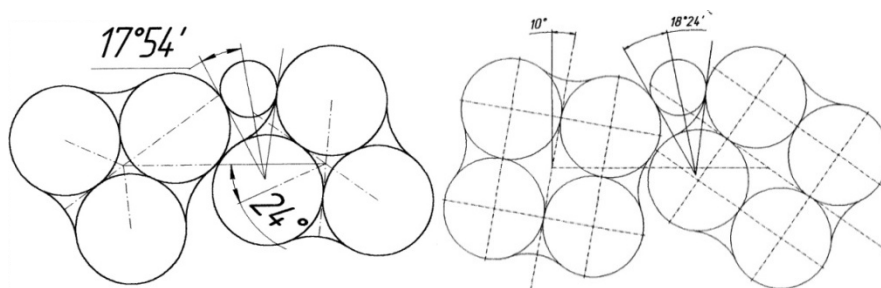


Рисунок 5 - Определение размеров валков ВВФ

Определяем путем непосредственного измерения на схеме требуемые параметры: соотношение размеров валка и куска материала $D/D_{\max} = 4,19$; степень измельчения $i = 6,16$. Аналогично сконструируем валки по четырем окружностям. В данном случае приемлемое соотношение $e/R = 0,133$. Постепенно поворачивая на схеме валки, находим такое положение, при котором угол захвата будет принимать максимально возможное значение.

Угол захвата $\alpha/2$, равный 18 градусов, достигается при повороте валков на 10 градусов относительно исходного положения (рис. 5).

Определяем требуемые параметры, измеряя по схеме: соотношение размеров валка и куска материала $D/D_{\max}=4,34$; степень измельчения $i=8,34$.

Результаты моделирования формы валков сведены в таблицу.

Параметры цилиндрических валков и валков ВВФ

1 Форма валка	Цилиндрическая (стандартная дробилка)	По трем окружностям (ВВФ)	По четырем окружностям (ВВФ)
2 Соотношение габаритного размера валка и размера куска материала D/D_{\max}	10...20	4,19	4,34
3 Степень измельчения	2...3 (4)	6,16	8,34

Соотношение D/D_{\max} размеров валка и куска материала для валка, образованного четырьмя окружностями, не намного больше, чем для образованного тремя окружностями, зато величина разгрузочной щели меньше, а степень измельчения i на 26% выше.

При этом валки ВВФ, образованные как четырьмя, так и тремя окружностями, имеют параметры намного лучшие, чем цилиндрические валки, а именно: диаметр валка у них в 3...5 раз меньше, а степень измельчения в 2...4 раза больше. Таким образом, по предварительным данным предложенная выпукло-вогнутая форма валков позволяет: улучшить захват материала валками, приближая эффективность валков с гладкой поверхностью к валкам с рифленой или зубчатой; уменьшить соотношение между размером гладкого валка и максимального куска исходного материала до значения 4...5; уменьшить в 3...4 раза диаметр валков; уменьшить размеры и материалоемкость дробилки; повысить степень измельчения до значения, равного 6...8.

Кроме того, за счет того, что камера дробления образуется двумя параллельными поверхностями (т. е. имеется зона параллельности), предлагаемая форма валков должна обеспечить повышение качества готового продукта по форме и гранулометрическому составу, т. е. уменьшить (а в идеале – устранить) неравномерность готового продукта по крупности и получать куски готового продукта преимущественно кубообразной формы. Также улучшение захвата кусков должно позволить увеличить частоту вращения валков n , которая у традиционных дробилок ограничена и может быть определена в зависимости от диаметра валка D по формуле $n=(1/D)...(2/D)$ [3, 4], об/с, из которой видно, что при уменьшении диаметра валка, как в случае применения валка ВВФ, частота вращения будет расти, а это, в свою очередь, позволит увеличить производительность.

Таким образом, по данным предварительных исследований и моделирования применение валков ВВФ вместо традиционных цилиндрических может устранить практически все отмеченные выше недостатки валковых дробилок и получить практически все заявленные выше улучшения показателей работы. Это позволяет говорить о целесообразности проведения дальнейших, более подробных исследований валков ВВФ.

Итак, можно сделать следующие выводы.

1. На основе анализа существующих валковых дробилок и их рабочих органов определены их основные недостатки, главным из которых является малый угол захвата кусков материала.

2. Перспективным способом устранения главного недостатка и повышения эффективности валковых дробилок может являться применение рабочих органов (валков), имеющих форму, отличную от цилиндрической.

3. Разработана и предварительно обоснована путем компьютерного моделирования новая полицилиндрическая ВВФ валков, позволяющая за счет уменьшения угла захвата по сравнению со стандартными цилиндрическими валками получить валковую дробилку, имеющую в 4...5 раз меньшие габаритные размеры, в 3...5 раз меньший диаметр валка и в 2...4 раза большую степень измельчения, чем у стандартной дробилки.

4. Необходимо продолжать работу по исследованию дробилок с полицилиндрическими валками ВВФ, определению и обоснованию их параметров.

5. Положительный результат этой работы позволит создать принципиально новую по своим показателям валковую дробилку со значительно улучшенными параметрами, которая сможет составить конкуренцию на внутреннем и внешнем рынке.

Список литературы

1. Белецкий Б.Ф. Строительные машины и оборудование: Справ. пособие. – Ростов н/Д, 2002. – 592 с.
2. Строительные машины: Справ.: В 2 т. / Под общ. ред. Т. 1 – Э.Н. Кузина, Т. 2 – М.Н. Горбовца. – М.: Машиностроение, 1991.
3. Мартынов В.Д. Строительные машины и монтажное оборудование. Учеб. для студентов вузов / В.Д. Мартынов и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
4. Дорожно-строительные машины и комплексы: Учеб. для вузов / Под общ. ред. В.И. Баловнева. – 2-е изд. дополн. и перераб. – М.; Омск: Изд-во СибаДИ, 2001. – 528 с. – 209 ил.
5. Дугин Ю.А. Теоретическое обоснование вальцового измельчающего устройства // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. ВГСХА. – Волгоград, 2005. – С. 18-21.
6. Цепляев А.Н. Особенности конструкции вальцового измельчительного аппарата / А.Н. Цепляев, Ю.А. Дугин // Вестник АПК Волгоградской области. – 2005. – № 1. – С. 21-22.
7. Ли С.В. Проектирование и конструирование рабочих органов строительно-дорожных машин с планетарным движением // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций. – 2003. – № 6. – Алматы, 2003. – С. 47-50.
8. Ли С.В. Дробилка с планетарно-роторным движением валков // Науч.-техн. сб. «Новости науки Казахстана». 2002. – № 3. – Алматы: КазГосИНТИ, 2002. – С. 38-40.
9. Гурьянов Г.А. Повышение эффективности валковых дробилок совершенствованием их рабочих органов / Г.А. Гурьянов, В.А. Ким // Материалы XI Респ. науч.-техн. конф. – Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2011. – Ч. III. – С. 100-101.
10. Гурьянов Г.А. Тенденции развития и совершенствования валковых дробилок / Г.А. Гурьянов, В.А. Ким // Современные научные исследования в дорожном и строительном производстве: Материалы Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Пермь: ПНИПУ, 2011. – Т. 1. – С. 91-95.
11. Гурьянов Г.А. Совершенствование конструкций валковых дробилок применением выпукло-вогнутого профиля валков / Г.А. Гурьянов, В.А. Ким // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2011. – Ч. II. – С. 184-188.
12. Сизиков В.Н. О повышении эффективности валковых дробилок в условиях инновационного развития строительной индустрии // Материалы V Респуб. науч.-техн. конф. – Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2005. – Ч. III. – С. 50-52.
13. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.
14. Дугин Ю.А. Моделирование вальцового измельчительного аппарата для определения основных параметров // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2006. – № 3. – С. 55-58.

Получено 2.08.2016

ЭОЖ 664.144

М.Е. Ержанова, А. Адилбаев, А.С. Тлешова

М.Х. Дулати атындағы Тараз мемлекеттік университеті, Тараз қ.

**ШЫРЫН ӨНДІРУДЕГІ ҚАУЫННЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ-МЕХАНИКАЛЫҚ
ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ**

Адам организмі дұрыс жұмыс атқаруы үшін оның физиологиялық функцияларын реттеуге бірқатар заттар керек. Оларға пробиотиктер, витаминдер, минералды заттар, тағамдық талшықтар және т.б. кіреді. Олар сумен және басқа да тамақ өнімдерімен организмге түседі.

Өртүрлі топтағы адамдарды зерттеу нәтижесі планетадағы адамдардың көп бөлігіне витамин жетіспейтіндігін көрсетті. Көктем айларында халықтың 70-80%-да авитаминоз байқалады. 50% адамдарда β -каротин, ал 62-85%-да В1 витамині жетіспейді. В2, В6, РР витаминдерінің және фоли қышқылының төмендеуі әсіресе өндірістік қалалардағы тұрғындарда көптеп кездеседі [1].

Қазіргі экологиялық прессинг жағдайында халықтың денсаулығы үшін табиғи функционалды тағам өнімдерін өндіру негізгі факторлардың бірі болып табылады. Арнайы шырындар мен сусындар өндіру, олардың әсер ету механизмі адам организмінің физиологиялық үрдістерінің қалыпқа келуіне көмектеседі [2]. Тамақ өнімдерінің ішінде жемістер мен көкөністердің организмді қорғау қабілеті жоғары [5].

Қауынның қоректік және емдік қасиеттеріне байланысты органолептикалық және текстуралық көрсеткіштері талапқа сай қауыннан жаңа өнімдерді алу қазіргі кезеңдегі болашағы зор бағыт болып табылады. Қауын өнімдерінің сақталу мерзімі аз болғандықтан, сақтау уақытын ұлғайту үшін оны өңдеудің жаңа принциптерін құрастыру керек. Қауын мен қарбызды қарқынды өңдей отырып, ұзақ сақталатын, сапасы жоғары өнімдер (шырындар, сусындар, джемдер, тосаптар және т.б.) алуға болады. Бұл табиғи өнімдер сұранысқа ие, сондықтан оның ассортиментін көбейту қажет.

Осы жұмыс қауын мен қарбыздың қабығын тазалауға арналған жаңа құралдарды таныстыруға, шырын дайындауға арналған құрылғының жұмысын түсіндіруге арналған. Алайда қауын мен қарбыздың физикалық-механикалық қасиеттерінің өзгеру заңдылықтарын зерттеуде және қауын мен қарбызды өңдеудің технологиялық схемасын құруда көптеген зерттелмеген мәселелер бар.

Шырын өндіретін технологиялық құрылғыларға есептеу жүргізу үшін өңделетін материалдың және өңделген тағамның физика-механикалық қасиеттерін білу керек. Табиғи шикізаттан шырын өндіргенде кесудің нақты күші, серпімділіктің көлемді модулі және қойыртпақтың тұтқырлығының тиімділігі анықтаушы қасиеттері болып табылады.

Қауыннан шырын алу үшін алдымен оны кесу керек, қабығынан жұмсағын бөліп алып, берілген мөлшерде кесу қажет. Сондықтан механикалық қасиеттерді зерттеу мақсатына қауынның қабығын және жұмсақ бөлігін кесудің нақты күшін анықтау жатады. Алынған бөлшектерді жаншып, одан өздігінен шырын аққаннан кейін, қалған қойыртпақты престейміз. Бұл үрдістерді есептеу үшін қойыртпақ тұтқырлығының тиімділігін, сондай-ақ жұмсақ бөлігі серпімділігінің көлемді модулін анықтау керек.

Зерттеу барысында қауынның Қазақстанның оңтүстік облысында өсетін және Өзбекстан Республикасынан әкелінетін өртүрлі сорттары таңдалды. Механикалық қасиеттері «Структурометр-1» негізінде жасалған өлшеу кешенінде анықталды (1-сурет). Алынған мәліметтер Microsoft Office Excel бағдарламасында өңделді. Кесудің нақты

күшін анықтауда структурометр үшін ауыспалы пышақ құралы алынды, оның кесу бөлігі 70 мм, ал биіктігі 25 мм, қайралатын бұрышы 12 градусты құрайды. Бұл оптималды нұсқа болып есептеледі [2]. Зерттеулер үшін арнайы сынама тандау құралы арқылы қауыннан бұрыштары тік, өлшемдері 40x40 мм, әр сортынан 5 данадан алынады. Сынамалар жұмсақ бөлігінен және қабығынан арнайы бөлек алынды.



1-сурет - Структурометр негізінде жасалған өлшеу кешені

Пышақты өлшеу құралының басына орнаттық, ал сынаманы структурометрдің жылжымалы үстеліне орналастырдық. № 2 режимдегі берілген мәндер (беріктіктің шегін анықтау): жанасу күші $F_0 = 0,5$ Н, үстелдің жылжу жылдамдығы $v = 2$ м/с. Мұндай жылдамдық оптималды болып табылады [3].

Құрылғы қосылған кезде, үстел жоғары қарай берілген жылдамдықпен жылжиды, пышақ қауын сынамасын басады және оны деформациялайды, одан кейін сынамаға енеді. Сынама бұзылған кездегі максималды күштің мәні алынады. Одан кейін үстел орнына келтіріледі. Алынған мәлімет компьютермен оқылады, сол мәндер бойынша Microsoft Office Excel бағдарламасында кесу күшінің графигі тұрғызылады.

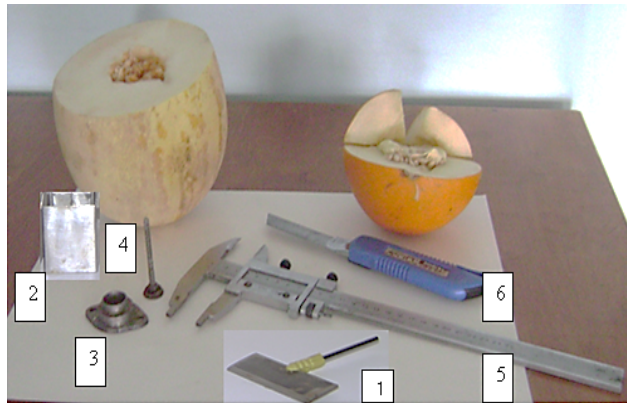
Кесудің нақты күші келесідей есептеледі: сынама талқандалған кездегі максималды күштің оның сызықтық мөлшеріне (ұзына бойына кесілген - 40 мм) қатынасына тең:

$$F_y = \frac{F_{\max}}{L}, \quad \text{Н / м.} \quad (1)$$

Структурометрге құрал ретінде металл цилиндр және диаметрі 20 мм пуансон алынды (2-сурет). Қауынның жұмсақ бөлігімен эксперимент жасағанда ішкі диаметрі 20 мм сынама тандағышқа цилиндрлік сынама дайындалды, оның шеттері цилиндр осіне перпендикуляр етіп кесіледі. Сынаманың биіктігі штангенциркульмен өлшенеді. Сынаманы цилиндрге және құралдың үстеліне орнатамыз. Структурометрдің өлшегішінің басына пуансон орналастырылады.

Қауынды 1x2x5 мм дейін бөлшектедік, өздігінен ағатын шырынды бөліп алып, қалғанын цилиндрге толтырдық ($H_0 = 25$ мм).

№ 1 режимде жұмыс істегенде (серпімділік және пластикалық деформацияны анықтау) берілген мәндер: жанасу күші $F_0 = 0,5$ Н, үстелдің жылжуын (20 мм/с интервалымен) 20-дан 100 мм/с ауыстырдық, максималды күш $F_{\max} = 100$ Н. Әр жылдамдықта, қауынның әр сортының жұмсақ бөлшектеріне, қойыртпаққа 5 өлшеу жүргізілді.



2-сурет - Қауынның физика-механикалық қасиеттерін анықтауға арналған құралдар:

1 – ауыспалы пышақ құралы; 2 – сынама тандау құралы; 3 – цилиндр;
4 – пуансон; 5 – штангенциркуль; 6 – пышақ

Құрылғыны қосқаннан кейін, берілген жылдамдықпен үстел жылжыды, үстелдің жылжуы және қысым күші құрылғымен өлшеніп, компьютерге енгізілді. Қысым күші берілген максималды күшке жеткенде, үстел төменгі минималды күшке - 0,5 Н жеткенге дейін жұмыс істеді.

Тұрақты деформацияның максималды H_1 және ақырғы H_2 мәндері құрылғының жадысында сақталады. Нәтижелер бойынша Microsoft Office Excel бағдарламасында график тұрғызылады. Алынған тәжірибелік мәліметтер кейбір салаларда технологиялық үрдістердің регламентін құруға пайдаланылады [2, 3]:

1. Иілгіштік:

$$P = \frac{h_0 - h_2}{h_0 + h_1} = \frac{t \sigma}{\eta_{np} (\lambda + 1)}, \quad (2)$$

мұндағы $\lambda = \frac{h_0}{h_1}$ - салыстырмалы бірсыздық қысым; t - уақыт, с; σ - кернеу, кПа; η_{np} -

деформация жылдамдығына байланысты келтірілген тиімді тұтқырлық, Па · с; $h_0 = H_0$; $h_1 = H_0 - H_1$; $h_2 = H_0 - H_2$.

2. Жұмсақтық:

$$S = \frac{h_0 - h_1}{h_0 + h_1} = \frac{(\eta_{np} + Et) \sigma}{E \eta_{gh} (\lambda + 1)}. \quad (3)$$

3. Салыстырмалы қысым :

$$R = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} = \frac{\eta_{np}}{\eta_{np} + Et}, \quad (4)$$

мұндағы E – қысым кезіндегі күштің көлемді модулі.

4. Қалпына келтірілуі:

$$R1 = 1 - R = \frac{Et}{\eta_{gh} + Et}. \quad (5)$$

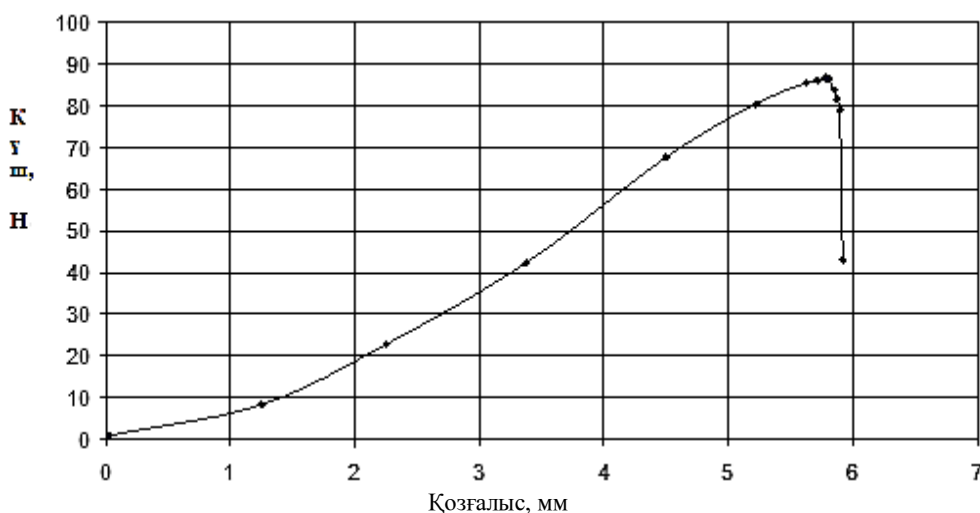
(2)-(5) теңдеулерін бірге есептей отырып, массаның тұтқырлық сипаттамасын анықтауға болады:

$$\eta_{cp} = \frac{\sigma t}{(\lambda + 1)P}, \quad (6)$$

$$E = \frac{\eta_{np}(1 + Rl)}{Rl t}. \quad (7)$$

Қауынның әр сортына және құрылғы үстелінің жылжу жылдамдығына анықталатын параметрлердің орташа мәндері есептелді және жылжу жылдамдығының тәуелділік графигі құрылды, тұтқырлық тиімділігі (қойыртпақ үшін), сондай-ақ алынған тәуелділік теңдеулері және аппроксимацияның сенімділігі R^2 (Microsoft Office Excel бағдарламасында) анықталды.

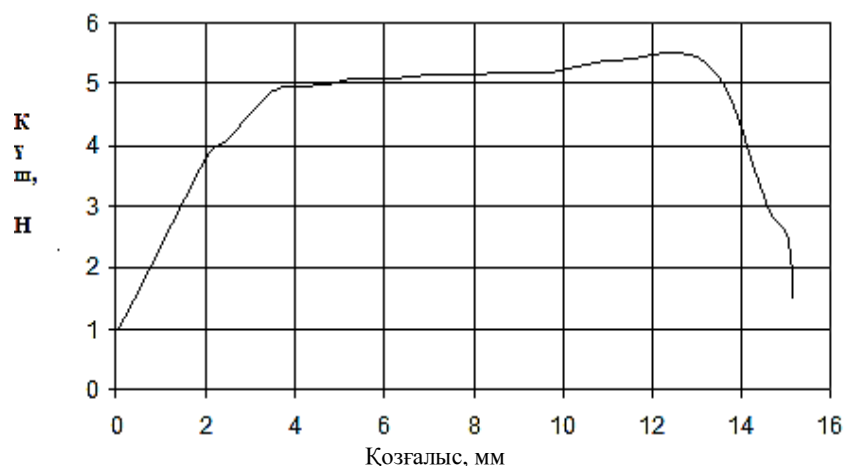
[3] жұмысқа шолу жасасақ, қауынның жұмсақ қабыққа жақын бөлігін кесудің нақты күшінің мәндері анықталған, олардың қабығының жұмсақ бөліктен бөлінуі қауын сорттарына байланысты. Пісу мерзімдеріне қарай қауынның ерте пісетін, орталау уақытта пісетін және кеш пісетін сорттары бар. Біздер қауынның жұмсақ бөлігін қабығынан айырғаннан кейін бірден кесудің нақты күшін анықтадық. 3 және 4-суретте қозғалыс тәуелділігі – қауынның қабығы мен жұмсақ бөлігін кесудің нақты күшінің графигі көрсетілген.



3-сурет - Қауынның тэрнек сортының қабығын кескендегі кесудің нақты күшінің пышақтың қозғалысына тәуелділігінің графигі

Келтірілген қисық сызықтарды нәтижелесек, барлық сорттарға осы сипаттама тән. Сонымен, пышақ қауын қабығына тиген мезетте серпімді-пластикалық деформация жүретінін байқауға болады. Кесу күшінің өзгеруі шамалы, деформацияның шекті мәнінде күштің өсуі байқалады, осының әсерінен материалдың бұзылуы көрінеді. Қауынның жұмсақ бөлігін кесуде кесу күшінің тұрақты екенін көреміз.

Қауынның әртүрлі сорттарын кесудің нақты күшінің мәндері және мәндердің орташаланған шамасы кестеде көрсетілген. Кестеден көретініміз, қауынның жұмсақ бөлігін кесудің орташа мәнінен ауытқуы (-7,20... +12,10%) мәндерінен аспайды, ал қабығы үшін (-4,00... +7,20%) мәндері.



4-сурет - Қауынның тэрнек сортының жұмсақ бөлігін кескендегі кесудің нақты күшінің пышақтың қозғалысына тәуелділігінің графигі

Қауынның әртүрлі сорттарын кесудің нақты күшінің мәндері және мәндердің орташаланған шамасы

№	Қауын сорттары	Кесудің нақты күші, Н/м	
		Жұмсақ бөлігі	Қабығы
1	Колхозница	227	2421
2	Илийская	225	2418
3	Ташлаки	208	2385
4	Ақ жамбылша	206	2386
5	Сары жамбылша	212	2392
6	Қызыл жамбылша	210	2394
7	Қара жамбылша	215	2398
8	Көк жамбылша	214	2387
9	Тэрнек	218	2412
10	Сладкий ананас	218	2415
11	Мельба	221	2425
12	Империл	224	2436
13	Ақ гурбек	218	2418
14	Ала гурбек	216	2410
15	Гарры қыз	208	2394
Орташа мәні		222	2423
Үлкен ауытқу		+12,10%	+4%
Кішкене ауытқу		-7,20%	-1,60%

Жұмысты қорытындылай келе, жүргізілген зерттеулерден кесудің нақты орташа мәні зерттелген қауын сорттарының ішінде жұмсақ бөлігі үшін 12% -дан, ал қауын қабығы үшін 4%-дан артпайтынын тұжырымдауға болады. Осы мәліметтерді қауынның әртүрлі сорттарына жүргізілетін инженерлік есептеулерде қор коэффициентін есептеуде пайдалануға болады.

Әдебиеттер

1. Шобингер У. Плодово-ягодные и овощные соки. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1980.

2. Edenharder H. The function of fruit and vegetable juices for the improvement of health and performance // Докл. на Междунар. конгрессе фруктовых соков. – Сан-Паулу, 1991. – С. 221-236.
3. Frankel E.N., Bosanek C.A., Meyer A.S., Silliman K and Kirk. Commercial grape juices inhibit the in vitro oxidation of human low-density lipoproteins // J. Agric. Sci., 1998. – 46. p. – 834-838.
4. Соболев Н.П. Витаминизированные напитки с пектином / Н.П. Соболев, Т.В. Родина, О.А. Малченко и др. // Пищевая промышленность, 1996. – № 6. – С. 32.
5. Кудряшова А.А. Новые продукты питания с использованием лекарственных растений Дальнего Востока / А.А. Кудряшова, Е.А. Платова, Р. Лепесова и др. // Тез. докл. науч.-практ. конф. – Ташкент, 1991.

Получено 9.08.2016

УДК 622.234:622.251 (075)

Т.М. Кумыкова, В.Х. Кумыков

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАМЕНЫ ШАХТНЫХ ВОЗДУХОПРОВОДОВ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ ПОЛИМЕРНЫМИ

Рудничные воздухопроводные сети представляют собой сложную разветвленную систему большой емкости, протяженностью в среднем до 30 и более километров. Эффективность работы пневмосетей с увеличением их протяженности снижается в связи с ростом потерь энергии сжатого воздуха при его транспортировке к потребителю.

В процессе обследования пневмоэнергокомплекса Тишинского рудника [1] (г. Риддер, Восточно-Казахстанская область) проведены замеры давления сжатого воздуха на различных участках пневмосети и забоях. Работы выполнялись с помощью переносных замерных станций, включающих манометры-самописцы. Развернутые диаграммы давлений воздуха на рудничных участках сети представлены на рис. 1. Проведенные исследования показали, что режим работы пневмосети рудника неустойчив, характеризуется неравномерным перепадом давления, значение которого превышает 0,2 МПа. При этом характер перепада давления, зафиксированный для главного магистрального трубопровода, распространяется на связанные с ним участковые и конечные элементы пневмосети. Давление воздуха на этих элементах всегда меньше, чем в главной магистрали из-за потерь на утечки и преодоление сопротивлений при транспортировании. Исследования показывают, что при увеличении утечек из воздухопровода, питаемого от общего коллектора, с 1,6 до 2,4 м³/с давление на входе в пневмосеть снижается с 0,78 МПа до 0,738 МПа, а на пневмоприемниках - с 0,63 до 0,58 МПа. Такие перепады давления приводят к резкому снижению производительности технологического оборудования.

Все эти отрицательные явления связаны не только с выявленным несоответствием геометрических параметров воздухопровода на отдельных участках производительности компрессорной станции, но и с плохим состоянием самих трубопроводов, эксплуатируемых в условиях повышенной влажности. Срок службы стальных труб во многих случаях не превышает 3-6 лет. Столь малый срок службы труб, необходимость их замены приводит к непроизводительной трате металла. Причем, чем больше давление в трубах, тем больше толщина их стенок. Это влечет за собой значительное увеличение расхода металла для изготовления труб. Вместе с тем широкое применение в различных отраслях промышленности находят полимерные трубы в трубопроводах, работающих при давлениях до 1,6 МПа.

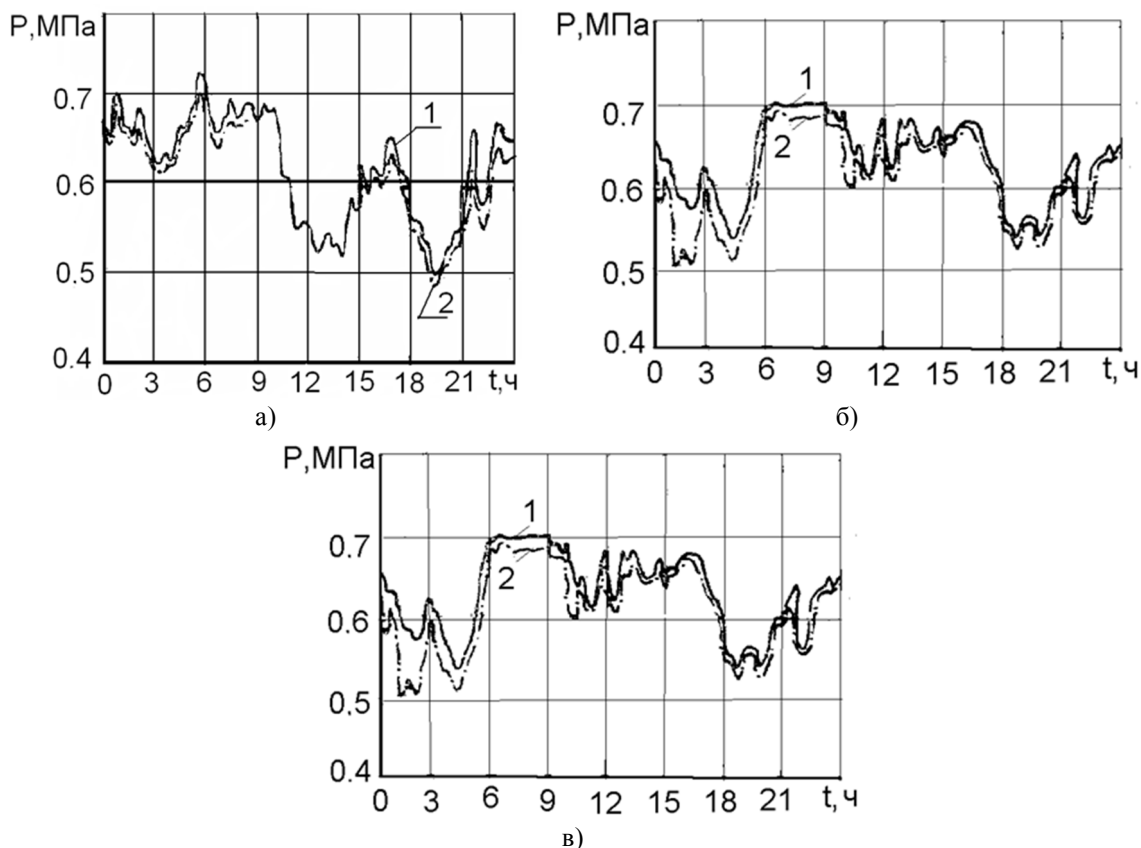


Рисунок 1 – Диаграмма давления в течение 1-х (а), 2-х (б) и 3-х (в) суток наблюдений:
1 – давление в магистральном трубопроводе; 2- давление у пневмоприемника

В результате анализа состояния теории и практики эксплуатации пневмоэнергокомплекса подземного рудника выявлено отсутствие данных, характеризующих гидравлические закономерности в полимерных трубах применительно к технике снабжения сжатым воздухом потребителей с пневмоприводом. Выявление и учет этих закономерностей при проектировании, строительстве и эксплуатации трубопроводов даст возможность улучшить работу последних.

При изучении современного состояния вопроса о гидравлическом расчете труб применительно к шахтным пневмосетям авторы поставили перед собой цель: сопоставить основные гидравлические закономерности турбулентного потока сжатого воздуха в трубах из традиционных материалов (стали) и относительно новых перспективных материалов (полимеров) [2-4].

Объективная оценка гидравлических характеристик труб и надежные рекомендации по их расчету могут быть даны лишь в результате исследований пропускной способности труб, увязанных с характеристикой их внутренней поверхности, которая определяется как материалом и способом изготовления труб, так и продолжительностью их эксплуатации. Основой предложенной методики послужили теоретические предпосылки и практические разработки известных ученых в области оптимизации гидро- и пневмосетей.

При этом устанавливаются значения трех основных характеристик:

- возможные потери давления;

- пропускная способность труб заданного диаметра при известной разности давлений;
- диаметр труб, обеспечивающий заданный расход воздуха.

При применении труб из любых материалов необходимо решать две задачи:

- задача синтеза (проектирования) рудничной пневматической системы;
- задача анализа режима работы рудничной пневматической системы.

В первом случае необходимо определить диаметры участков пневмосети при заданных расходах по участкам сети и давлениям в узловых точках. В задачу анализа входит определение потерь давления на участках сети при заданных расходах воздуха и диаметрах трубопроводов.

При анализе режима работы рудничных пневматических сетей определяют обычно давление сжатого воздуха в начале участка. Для этого необходимо определить диаметр участка, расход сжатого воздуха на нем и давление в конце участка пневмосети.

Разработанные основы методики гидравлического расчета труб шахтной пневмосети из различных материалов позволяют выявить рациональность замены применяемых традиционно стальных труб на трубы из полимерных материалов, позволяющих снизить металлоемкость пневматической сети и трудоемкость работ при ее монтаже.

Для технологической оценки эффективности замены металлических труб полимерными в системе пневмоэнергокомплекса подземного рудника сравнивались потери давления на участках пневмосети из металлических и полимерных труб. Был произведен расчет потерь давления на герметичном участке воздухопровода, выполненного из металлических и полимерных труб. Построены сопоставительные графики, приведенные на рис. 2, 3.

Полученные данные позволяют построить номограмму (рис. 4) для выбора сечений полимерных труб при замене ими металлических. Из номограммы видно, что пропускная способность полимерных труб больше, чем у металлических.

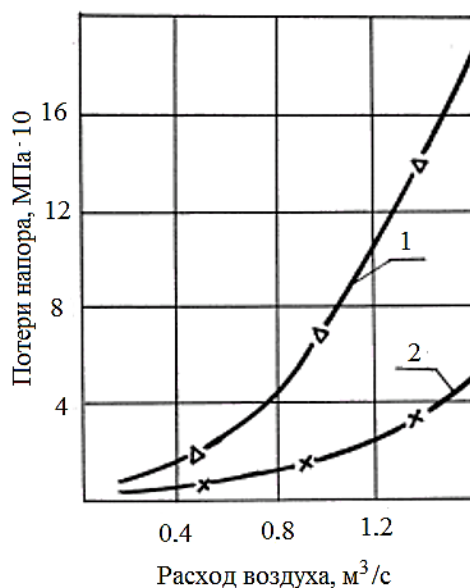


Рисунок 2 – Зависимость потерь напора от расхода сжатого воздуха:

1 - в металлическом трубопроводе; 2 - в полимерном трубопроводе ($D=0,1$ м; $P_2=0,5$ МПа)

Причем с увеличением расхода сжатого воздуха разница в пропускной способности полимерных и металлических труб возрастает, что наглядно представлено на рис. 5.

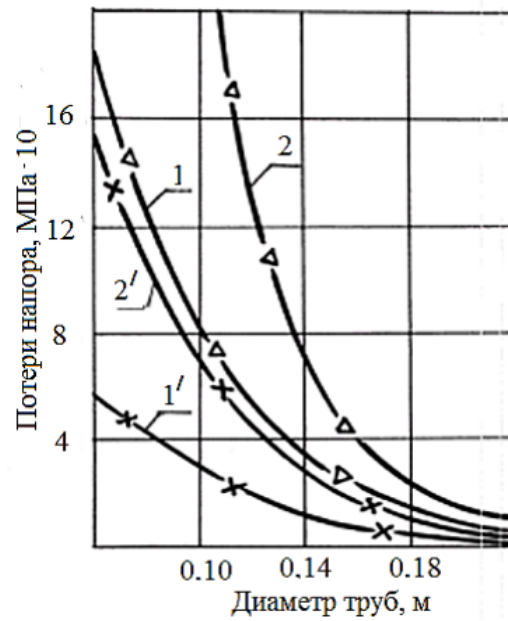


Рисунок 3 - Зависимость потерь напора от диаметра труб:
1, 2 – металлических при $Q=1$ и $2 \text{ м}^3/\text{с}$; 1', 2' – полимерных при $Q=1$ и $2 \text{ м}^3/\text{с}$ ($P_2 = 0,5 \text{ МПа}$)

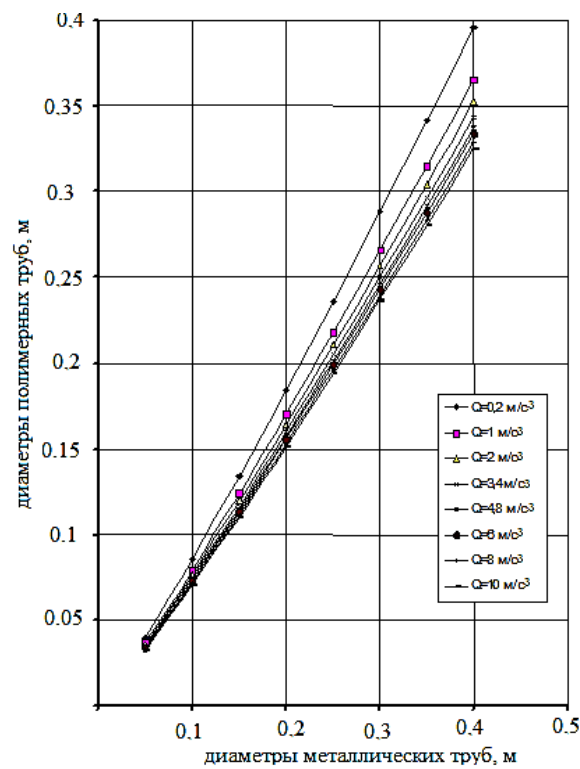


Рисунок 4 – Номограмма для выбора сечений полимерных труб

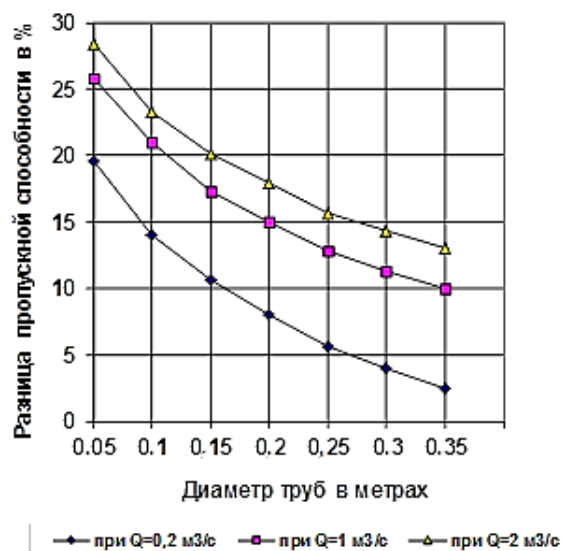


Рисунок 5 - Градиент пропускной способности полимерных труб

Полученные данные позволяют сделать вывод, что пропускная способность полимерных труб в среднем на 20-25% выше, чем у металлических. Следовательно, при замене металлических труб полимерными, в зависимости от диаметра труб и расхода сжатого воздуха, диаметр полимерных труб можно принимать на 10-15% меньше, чем металлических. Выявленные авторами гидравлические закономерности в области потерь давления в полимерных трубах согласуются с данными ряда исследователей, проводивших опыты с трубами из различных материалов для систем водоснабжения [5, 6].

При применении стальных труб следует учитывать возможность возрастания в них потерь давления из-за уменьшения живого сечения трубы и увеличения шероховатости в процессе эксплуатации. А при использовании полимерных труб, по-видимому, надо принять гипотезу постоянства гидравлического сопротивления в процессе их работы, поскольку их внутренняя поверхность с течением времени не подвергается изменениям, вследствие чего расчетные значения потерь давления сохраняются на весь период работы.

Главными факторами, определяющими область применения материала воздухопровода, являются давление, температура и транспортируемая среда. Четвертым фактором, оказывающим влияние на выбор материала, является наличный ассортимент труб. Особое значение для высвобождения металла при строительстве шахтного воздухопровода имеют трубы, вырабатываемые из различных пластмасс, в частности из полиэтилена и винилпласта.

При этом несомненный интерес представляет химическая стойкость пластмасс в многочисленных средах в эксплуатационный период. По результатам теоретических и лабораторных экспериментальных исследований выявлены два чрезвычайно ценных факта – высокая коррозионная стойкость и то, что пластмассовые трубы не склонны к образованию отложений на гладких внутренних поверхностях [3]. Пластмассовые трубы выгодно отличаются от металлических значительно большим сроком службы, сравнительной легкостью производства монтажных работ.

На основе обобщения передового отечественного и зарубежного опыта эксплуатации пластиковых трубопроводов [3, 4, 7] и лабораторных исследований, проведенных в лаборатории «Механизации подземных горных работ» (МПГР) (ВНИИцветмет), предложено

при проектировании шахтных пневмосетей использовать полиэтиленовые трубы. Полиэтилен является продуктом полимеризации углеводородов. Полиэтиленовые трубы вырабатываются из полиэтилена низкой плотности, получаемого при высоком давлении, и из полиэтилена высокой плотности, вырабатываемого при низком давлении. Полиэтиленовые трубы являются эластичными и нежесткими.

Установлено, что полиэтиленовые трубы, по сравнению с другими пластмассовыми, в настоящее время являются наиболее перспективными. Небольшой вес полиэтиленовых труб при значительной длине создают большие удобства при монтаже рудничных воздухопроводов. Тот факт, что пропускная способность полиэтиленовых труб значительно больше, чем стальных, дает возможность уменьшить их расчетное сечение.

На основании изложенного можно заключить, что монтаж и эксплуатация трубопроводов из полиэтиленовых труб имеют свои особенности:

- для компенсации линейных изменений трубопроводов значительной протяженности, не имеющих поворотов, следует предусматривать установку специальных устройств;
- в связи с более низкой по сравнению с металлическими жесткостью полиэтиленовых труб, трубопроводы из них требуют повышенного расхода опор на вертикальном и горизонтальном направлениях;
- полиэтилен горюч, горит с выделением окиси углерода.

Названные особенности предопределяют:

- использование разработанного быстроразъемного соединения полиэтиленовых труб с компенсатором изменения их длины под влиянием изменений температуры;
- необходимость исключать возможность контакта трубы из полиэтилена с открытым пламенем, а рабочие места, где возможно воспламенение полиэтилена от инструмента, разогретого до температуры свыше 250 °С, оборудовать средствами пожаротушения и приточной вентиляции.

Внедрение технических мероприятий по реконструкции трубопроводов и организация ее рациональной эксплуатации повысят эффективность работы пневмосети рудника.

Список литературы

1. Внедрение комплекса мероприятий, направленных на снижение непроизводительных потерь сжатого воздуха на Тишинском руднике: Инф. карта // ВНИИцветмет – Усть-Каменогорск, 1986.
2. Кумыкова Т.М. Исследование возможности снижения потерь энергии сжатого воздуха в условиях подземного рудника / Т.М. Кумыкова, Л.А. Проходова // Резервы повышения эффективности разработки рудных месторождений. – Усть-Каменогорск, 1990.
3. Кумыкова Т.М. Исследование влияния материала воздухопровода на потери энергии сжатого воздуха в пневмоэнергокомплексе подземного рудника / Т.М. Кумыкова, Г.Д. Лисовский // Молодые ученые – 10-летию Независимости Казахстана: Тр. Междунар. конф. – Алматы: КазНТУ, 2001.
4. Изыскать область эффективного применения полимерных труб в системе рудничного пневматического хозяйства: Инф. карта// ВНИИцветмет. – Усть-Каменогорск, 1988.
5. Исследование и внедрение полиэтиленовых труб на обсадке скважин и в закладочном трубопроводе: Информ. карта / ВНИИцветмет. – Усть-Каменогорск, 1990.
6. Ромейко В.С. Пластмассовые трубопроводы / В.С. Ромейко, А.Н. Шестопал, А.А. Перелон. – М.: Высшая школа, 1984.
7. Зайцев К.И. Сварка полимерных материалов / К.И. Зайцев, Л.Н. Мацюк. – М.: Машиностроение, 1988.
8. Цейтлин В.А. Пневматические установки шахт / В.А. Цейтлин, Ю.А. Мурзин. – М.: Недра, 1985.
9. Справочник по пластмассовым трубам. – Пер. с нем. / Под ред. В.С. Кима. – Л.: Химия, 1985.
10. Колчинский Ю.Л. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов из неметаллических материалов. – М.: Стройиздат, 1985.

Получено 18.05.2016

УДК 631.171

С.О. Нукешев

Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, г. Астана

В.Р. Славов, Д.П. Карайванов

Химико-технологический и металлургический университет, г. София

Н.Н. Романюк

Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск

Н.А. Какабаев

Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, г. Астана

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАЯТНИКОВОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ СОШНИКА ЗЕРНОТУКОВОЙ СЕЯЛКИ

Анализ исследований показывает, что подпочвенно-разбросной способ посева семян создает наиболее благоприятные условия для роста и развития возделываемых культур [1-5]. Сошники сеялок, предназначенных для разбросного подпочвенного посева, снабжаются различными распределителями, которые обеспечивают распределение семян и удобрений в ограниченном по высоте подлаповом пространстве. Самым распространенным, простым по конструкции является пассивный распределитель, имеющий различные формы. Однако неравномерность распределения семян и гранул удобрений по ширине захвата у этих распределителей высокая. Низкую неравномерность распределения материала имеют вибрационные распределители, но у них усложнена конструкция. В связи с этим, работа, направленная на повышение равномерности распределения семян по площади поля путем применения сошника с маятниковым распределительным устройством в подлаповом пространстве, является актуальной и имеет практическое значение.

Цель исследований – определение траектории движения маятникового распределителя в подлаповом пространстве сошника.

Техническая задача в общем заключалась в снижении неравномерности распределения и в увеличении ширины высеваемой ленты семян зерновых культур и/или минеральных удобрений. Для решения поставленной задачи на кафедре технической механики Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина разработан сошник, где внутри подлапового пространства на шарнирно подвешенной скобе установлен маятниковый распределитель в виде полусферы [6]. Ось вращения полусферы параллельна горизонтальной оси симметрии шарнира подвески скобы и совпадает с направлением движения агрегата.

Технологический процесс протекает следующим образом. При падении семени ударяются о маятниковый распределитель и рассеиваются во все стороны, равномерно распределяясь на всю ширину захвата стрелчатой лапы.

Исследование сошников зернотуковых сеялок для разбросного способа посева рассмотрено в работах [7, 8] и др. Указанные исследования выполнены с использованием основных положений, законов и методов классической механики. Для исследования маятникового распределителя, работающего за счет неконтролируемых вынужденных и собственных колебаний, на наш взгляд наиболее подходит матричный метод, преимуществами которого являются:

- возможность описания большего количества параметров;
- удобство для программирования и расчета с использованием компьютера;
- совместимость с современными программными обеспечениями САПР;
- визуализация полученных результатов.

Моделированию матричным методом различных механических систем в 3D-пространстве посвящены работы [9-13] и другие.

Для описания движения маятникового распределителя сошника зернотуковой сеялки в 3D-пространстве создадим и рассмотрим его кинематическую модель с использованием следующих обозначений (рис. 1):

- $O_0X_0Y_0Z_0$ – начальная прямоугольная система координат;
- $O_1X_1Y_1Z_1$ – подвижная прямоугольная система координат, связанная с рамой сеялки (тело 1);
- $O_2X_2Y_2Z_2$ – подвижная прямоугольная система координат, связанная с направляющим козырьком (тело 2);
- $O_3X_3Y_3Z_3$ – подвижная прямоугольная система координат, связанная с маятниковым распределителем (тело 3);
- x_1, y_1, z_1 – небольшие перемещения по осям координат рамы сеялки (тело 1);
- $\theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1}$ – небольшие вращения вокруг оси координат рамы сеялки (тело 1);
- $\Phi_{1,2}$ – относительная степень свободы (прямо с тело 1) вращения направляющим козырьком (тело 2) вокруг оси O_2X_2 ;
- θ_{y3} – относительная степень свободы (прямо с тело 2) вращения маятникового распределителя (тело 3) вокруг оси O_3Y_3 ;
- N – произвольные точки маятникового распределителя в системе координат $O_3X_3Y_3Z_3$;

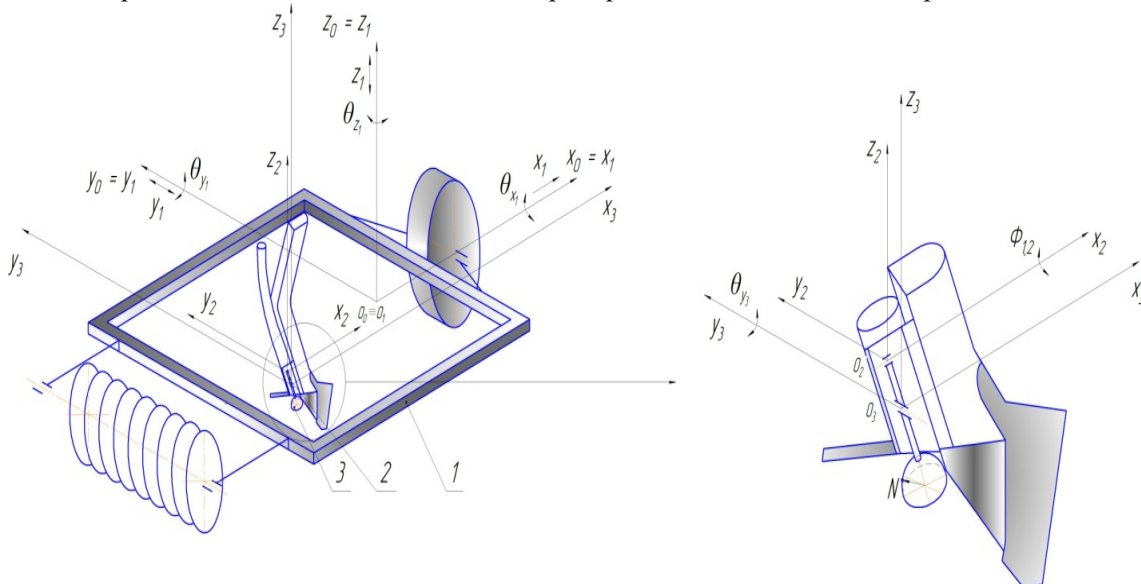


Рисунок 1 – Кинематическая модель

Вектор обобщенных координат механических систем запишем в следующем виде:

$$\mathbf{q} = [x_1 \quad y_1 \quad z_1 \quad \theta_{x1} \quad \theta_{y1} \quad \theta_{z1} \quad \Phi_{23}]_{8 \times 1}^T. \quad (1)$$

Составим матрицы перехода между системами координат для рамы сеялки, козырька со стойкой и маятникового распределителя.

Для маятникового распределителя:

- расстояние между центрами систем координат $O_2X_2Y_2Z_2$ и $O_3X_3Y_3Z_3$:

$$\mathbf{At}_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{x23} \\ 0 & 1 & 0 & l_{y23} \\ 0 & 0 & 1 & l_{z23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

- небольшое вращение маятникового полушара вокруг оси $O_3 Y_3$:

$$\mathbf{Au}_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_{y3} & 0 & \sin \theta_{y3} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{y3} & 0 & \cos \theta_{y3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Матрица перехода системы координат $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ в $O_2 X_2 Y_2 Z_2$:

$$\mathbf{A}_3^2 = \mathbf{At}_3^2 \cdot \mathbf{Au}_3. \quad (4)$$

Матрица перехода системы координат $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ в $O_0 X_0 Y_0 Z_0$:

$$\mathbf{A}_3^0 = \mathbf{A}_2^0 \cdot \mathbf{A}_3^2. \quad (5)$$

Аналогично составляются матрицы перехода между системами координат для рамы сеялки и козырька со стойкой.

Радиус-вектор точки N на поверхности маятникового распределителя в системе координат $O_3 X_3 Y_3 Z_3$:

$$\mathbf{r}_{N3} = [l_{xN3} \quad l_{yN3} \quad l_{zN3} \quad 1]^T. \quad (6)$$

Положение радиус-вектора в точке N на поверхности маятникового распределителя в начальной системе координат $O_0 X_0 Y_0 Z_0$:

$$\mathbf{R}_{N3}^0 = \mathbf{A}_3^0 \cdot \mathbf{r}_{N3}. \quad (7)$$

Дифференцируя во времени выражение (7) положения радиус-вектора точки, получим скорость произвольной точки N на поверхности маятникового распределителя в системе координат $O_0 X_0 Y_0 Z_0$:

$$\mathbf{V}_{N3}^0 = \frac{d \mathbf{R}_{N3}^0}{dt}. \quad (8)$$

Проекция вектора угловой скорости маятникового распределителя в систему координат $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ определяется как:

$$\boldsymbol{\omega}_{33} = \mathbf{Au}_3^T \cdot \boldsymbol{\omega}_{22} + \boldsymbol{\omega}_{3y3}, \quad (9)$$

где

$$\boldsymbol{\omega}_{3y3} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{y3} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Аналогично определяются проекции вектора угловой скорости в систему координат для рамы и козырька со стойкой.

Для проверки адекватности полученных аналитических выражений рассмотрим механическую систему сошника зернотуковой сеялки с маятниковым распределителем и прием реальными конструктивными параметрами.

Входные данные:

-скорость поступательного движения – $v_n=1,94$ м/с;

-координаты точки N_1 , N_2 и N_3 в системе координат $O_3X_3Y_3Z_3$:

$$\mathbf{R}_{N1} = [l_{Nx1} \quad l_{Ny1} \quad l_{Nz1}]^T = [-0,040 \quad 0 \quad -0,030]^T,$$

$$\mathbf{R}_{N2} = [l_{Nx2} \quad l_{Ny2} \quad l_{Nz2}]^T = [0,040 \quad 0 \quad -0,030]^T,$$

$$\mathbf{R}_{N3} = [l_{Nx3} \quad l_{Ny3} \quad l_{Nz3}]^T = [0 \quad 0,040 \quad -0,030]^T;$$

-расстояние между системами координат $O_1X_1Y_1Z_1$ и $O_2X_2Y_2Z_2$:

$$\mathbf{At}_2^1 = [l_{X12} \quad l_{Y12} \quad l_{Z12}]^T = [-0,5 \quad 0 \quad -0,2]^T;$$

-расстояние между системами координат $O_2X_2Y_2Z_2$ и $O_3X_3Y_3Z_3$:

$$\mathbf{At}_3^2 = [l_{X23} \quad l_{Y23} \quad l_{Z23}]^T = [0 \quad 0 \quad -0,03]^T.$$

С использованием компьютера находим зависимости линейной скорости точек N_1 , N_2 и N_3 на поверхности маятникового распределителя и проекции угловой скорости маятникового распределителя в системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$ от времени. Меняя высоту маятникового распределителя получаем разные траектории его движения. Анализ показывает, что при увеличении высоты маятникового распределителя частота колебаний увеличивается (рис. 2-4).

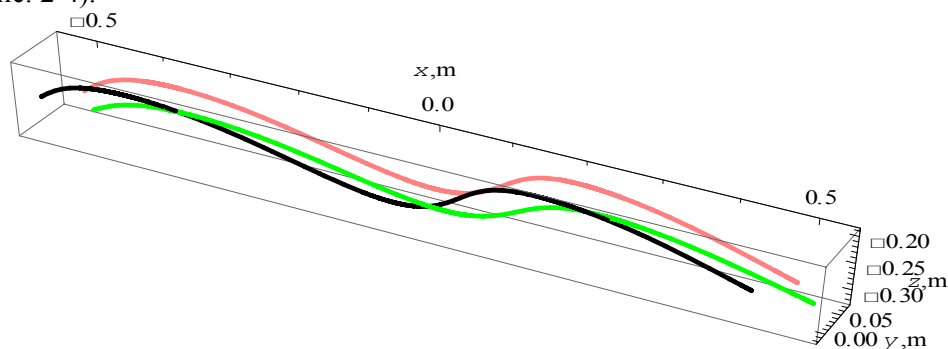


Рисунок 2 –Траектория точек N_1 , N_2 и N_3 на поверхности маятникового распределителя в 3D – пространстве

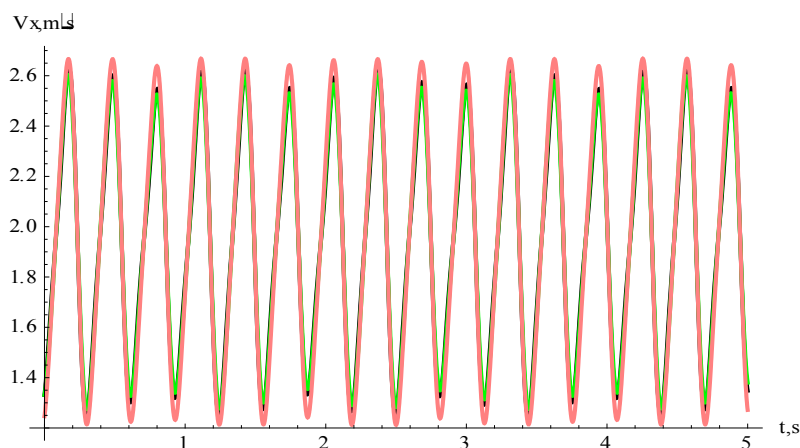


Рисунок 3 – Зависимости линейной скорости точек N_1 , N_2 и N_3 на поверхности маятникового распределителя по оси OX от времени t

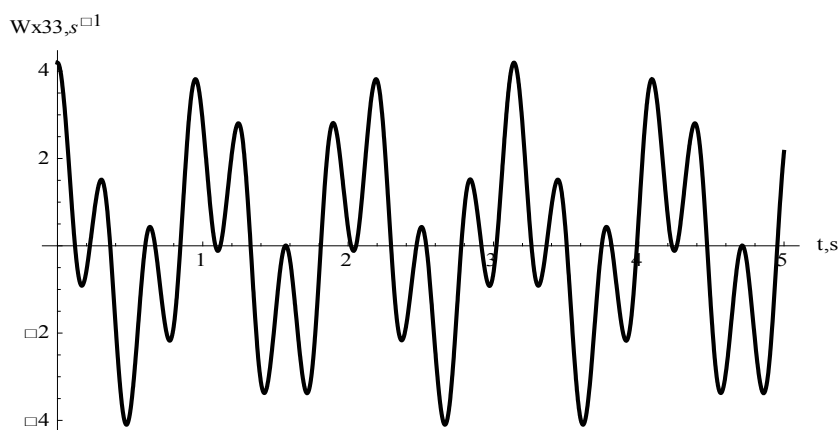


Рисунок 4 – Зависимости угловой скорости маятникового распределителя по оси OX от времени t

На основании вышеизложенного можно сделать следующее. По результатам проведенных теоретических исследований получены траектории движения для произвольных точек N_1 , N_2 и N_3 механической системы маятникового распределителя в 3D-пространстве. Составлен алгоритм расчета и получены зависимости линейной и угловой скоростей тел от времени. Зависимости показывают, что при увеличении высоты маятникового распределителя частота его колебаний увеличивается. Эти результаты будут использоваться при дальнейшем исследовании динамики механической системы исследуемого сошника зернотуковой сеялки.

Список литературы:

1. Heege, H.J. Zur Frage der Sätechnik für Getreide. Landtechnik. 1981, v 36, № 2. – p. 66-69.
2. Беспямятнова Н.М. Исследование параметров и режимов разбросного способа посева / Н.М. Беспямятнова, П.В. Лаврухин // Техника в сельском хозяйстве – 1991. – № 3. – С. 38 –40.
3. Артамонов В. А. Обоснование параметров распределительного устройства сеялок для безрядкового посева семян зерновых культур: Автореф. канд. дис. – Москва, 2007. – 23 с.
4. Karayel, D., Ozmerzi, A., 2007. Comparison of vertical and lateral seed distribution of furrow openers using a new criterion. Soil and Tillage Research 95, 69-75.
5. Heege H. and Feldhaus B. "Site Specific Control of Seed-Numbers per Unit Area for Grain Drills". Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript PM 01 012. Vol. IV. December, 2002.
6. Инновационный пат. 29217 РК. Посевной агрегат / КАТУ им. С. Сейфуллина; Опубл. 15.12.2014, бюл. №12. – 4 с.: ил.
7. Повышение эффективности функционирования посевных машин путем оптимизации конструктивных параметров рабочих органов / А.П. Шевченко, В.А. Домрачев. Омск, 2005.-119с.
8. Красильников Е.В. Обоснование параметров пневмомеханической высевашей системы, обеспечивающей равномерное распределение семян зерновых культур: дис. ... кан. тех. наук. Омск, 2009. – 156с.
9. Denavit J., Hartenberg R.S. (1955) Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. ASME J Appl Mech
10. Uicker J.J. (1963) Velocity and acceleration analysis of spatial mechanisms using 4x4-matrices. Inst Evanson, IL
11. Angelov I. (2011) Matrices mechanics. Kinematics. Avangard Prima. Sofia (in Bulgarian).

12. Angelov I., Slavov V. (2006) Matrices mechanics. Kinematics. Problem Book. Avangard Prima, Sofia (in Bulgarian)
13. Amiroche FML. (1993) Computer-aided design and manufacturing. Prentice Hall. Englewood Cliffs.

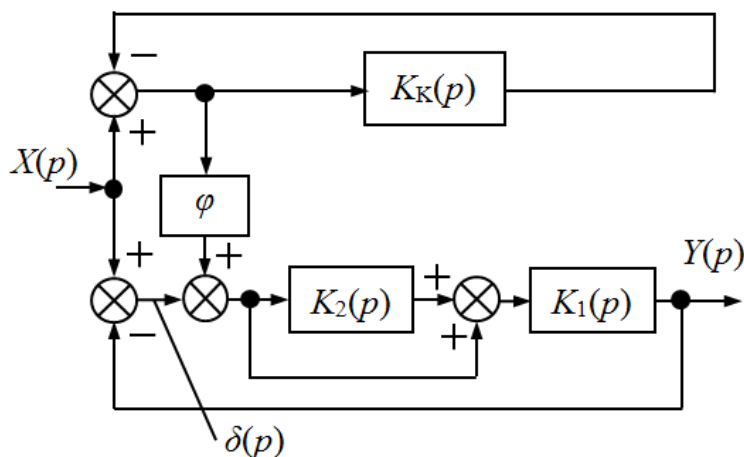
УДК 681.2 (075.8): 681.5(075.8): 006.91(075.8)

А.П. Парамзин

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАЛОГО ПАРАМЕТРА НА УСТОЙЧИВОСТЬ И КАЧЕСТВО ОБЪЕДИНЁННОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматриваемая в статье объединённая линейная автоматическая система имеет структуру (рис. 1) и содержит [1, 2]: основную (силовую) систему – блоки с передаточными функциями $K_1(p)$ и $K_2(p)$; корректирующую систему – $K_K(p)$; звено связи – φ . Обе системы имеют внешние отрицательные обратные связи. Основная система спроектирована оптимально с помощью активного корректора с передаточной функцией $\{1 + K_2(p)\}$ [3].



$$K_1(p) = \frac{K_{10}}{\sum_{i=1}^n (1 + \tau_i p)}$$

$$K_2(p) = \frac{K_{20}}{\sum_{j=1}^m (1 + \tau_j p)}$$

$$K_K(p) = \frac{K_{K0}}{\sum_{l=1}^q (1 + \tau_l p)}$$

K_{10}, K_{20}, K_{K0} – статические коэффициенты передачи; $\tau(i, j, l)$ – постоянные времени

Рисунок 1 – Структурная схема объединённой автоматической системы

В соответствии с алгоритмом оптимального синтеза основной системы [3, 4] передаточные функции её блоков формируются в виде (1) при условии, что постоянная времени τ_0 определяет верхнюю границу диапазона рабочих частот, то есть $f_0 = \omega_0/(2\pi) = 1/(2\pi\tau_0)$:

$$K_1(p) = \frac{K_{10}}{(\tau_0 p + 1)^2}; \quad K_2(p) = \frac{K_{20}}{(\tau_0 p + 1)^2}. \quad (1)$$

Это позволяет максимально реализовать потенциальные возможности системы и обеспечивает требуемые запасы устойчивости и показатели качества на средних и высоких частотах, но статическая ошибка δ_0 имеет конечное значение и определяется выражением:

$$\delta_0 = \frac{1}{1 + K_{10}(K_{20} + 1)} \cdot x_0. \quad (2)$$

Структура рис. 1 с корректирующей системой сформирована с целью компенсации статической ошибки основной системы за счёт придания ей свойства астатизма первого порядка. В результате статическая ошибка объединённой системы будет иметь вид:

$$\delta_0 = \frac{1 - \varphi \cdot \frac{K_{10}(K_{20} + 1)}{K_{K0} + 1}}{1 + K_{10}(K_{20} + 1)} \cdot x_0, \quad (3)$$

откуда следует условие её компенсации:

$$\varphi = \frac{K_{K0} + 1}{K_{10}(K_{20} + 1)}. \quad (4)$$

Данное условие представляет интерес с математической точки зрения, тогда как в физических системах его поддержание весьма проблематично по причине неустойчивости входящих в (4) параметров.

Целью настоящей статьи является оценка влияния неустойчивости статических коэффициентов передачи блоков основной и корректирующей систем на условия устойчивости и качество объединённой системы.

Неустойчивость статических коэффициентов передачи блоков системы зададим в виде вариационного параметра $\pm \Delta K$, выступающего в роли малого параметра. Рис. 2 демонстрирует характер изменения статической ошибки основной системы при $x_0 = 1$, $K_{10} = 100 \pm 100 \cdot \Delta K$, $K_{20} = 10 \pm 10 \cdot \Delta K$ (значения выбраны произвольно и не противоречат алгоритму оптимального синтеза), в свою очередь:

- штрих-пунктирная линия: $K_{10} = 100 \pm 100 \cdot \Delta K$, $K_{20} = 10 = \text{const}$;
- пунктирная линия: $K_{10} = 100 = \text{const}$, $K_{20} = 10 \pm 10 \cdot \Delta K$;
- сплошная линия: $K_{10} = 100 \pm 100 \cdot \Delta K$, $K_{20} = 10 \pm 10 \cdot \Delta K$.

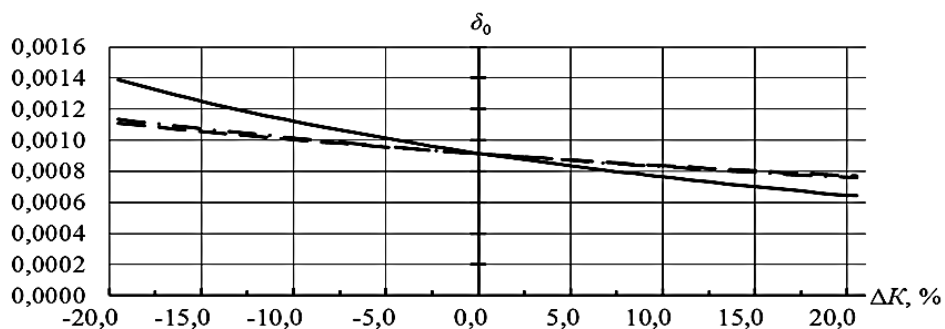


Рисунок 2 - Статические ошибки основной системы при вариации параметров ΔK_{01} и ΔK_{02}

Из рис. 2 видно, что увеличение статических коэффициентов передачи блоков в случае $\Delta K > 0$ уменьшает ошибку, и это очевидно, так как увеличивается глубина обратной связи, но одновременно уменьшается запас устойчивости по модулю. Поэтому в данном случае следует принимать во внимание требование алгоритма оптимального синтеза основной системы, в соответствии с которым необходимо соблюдать следующее соотно-

шение статических коэффициентов передачи блоков: $K_{01} / K_{02} \geq 10$. Для рассмотренного примера уменьшение запаса устойчивости по модулю не критично, так как алгоритмом оптимального синтеза предусматривается 30%-й запас устойчивости по модулю.

На рис. 3 приведены аналогичные зависимости для объединённой системы, которые получены в предположении, что корректирующая система максимально защищена от воздействия внешних факторов, влияющих на стабильность её параметров. В свою очередь, значение $K_{K0} = K_{20}$.

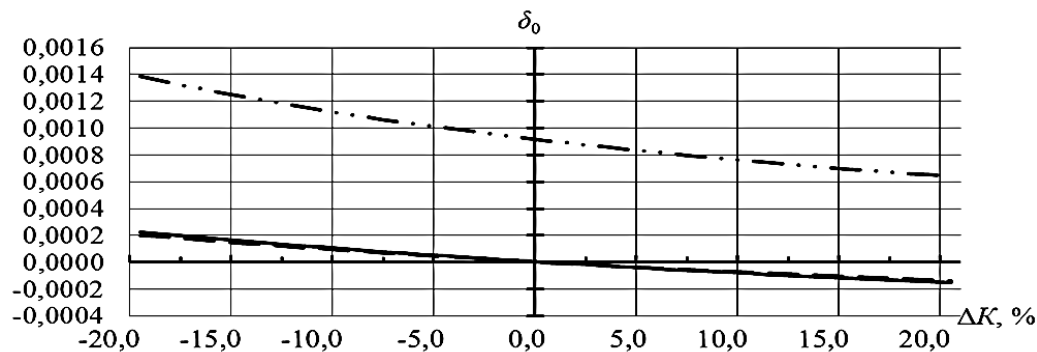


Рисунок 3 – Статические ошибки объединённой системы при вариации параметров ΔK_{01} и ΔK_{02}

Сравним полученные результаты с учётом $\pm 10\%$ -й нестабильности статического коэффициента передачи блока $K_1(p)$. Поскольку блок $K_2(p)$ является входным, то при проектировании основной системы можно минимизировать нестабильность K_{02} , чего невозможно осуществить применительно к K_{01} (см. табл.).

Параметры	$ \delta_0 , \%$	
	Основная система	Объединённая система
$\Delta K = 0$ $K_{01} = 100, K_{02} = 10$	+ 0,09	—
$\Delta K = \pm 10 \%$ $K_{01} = 100 \pm 10, K_{02} = 10$	0,08 ($K_{01} = 110$)	—
	0,1 ($K_{01} = 90$)	—
$\Delta K = 0$ $K_{01} = 100, K_{02} = 10, K_{K0} = 10$	—	0
$\Delta K = \pm 10 \%$ $K_{01} = 100 \pm 10, K_{02} = 10, K_{K0} = 10$	—	0,008 ($K_{01} = 110$)
	—	0,01 ($K_{01} = 90$)

Для оценки изменения других показателей качества объединённой системы по отношению к показателям качества основной системы воспользуемся частотными характеристиками. Передаточная функция замкнутой объединённой системы имеет вид:

$$W_{30}(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K_1(p) \cdot [K_2(p) + 1] \cdot [K_K(p) + 1 + \varphi]}{\{1 + K_1(p) \cdot [K_2(p) + 1]\} \cdot [K_K(p) + 1]}, \quad (5)$$

от которой перейдём к передаточной функции $W_{po}(p)$ разомкнутой системы при условии, что $W_{po}(p) = W_{30}(p)[1 - W_{30}(p)]$:

$$W_{po}(p) = \frac{K_1(p) \cdot [K_2(p) + 1] \cdot [K_K(p) + 1 + \varphi]}{[1 + K_1(p) + K_1(p)K_2(p)] \cdot [K_K(p) + 1] - K_1(p) \cdot [K_2(p) + 1] \cdot [K_K(p) + 1 + \varphi]} \quad (6)$$

и после преобразований получим:

$$W_{\text{PO}}(p) = \frac{K_1(p) \cdot [K_2(p) + 1] \cdot [K_K(p) + 1 + \varphi]}{[K_K(p) + 1] - \varphi \cdot K_1(p) \cdot [K_2(p) + 1]}. \quad (7)$$

Выполним переход в частотную область:

$$W_{\text{PO}}(j\omega) = \frac{A(\omega) + jB(\omega)}{C(\omega) + jD(\omega)}, \quad (8)$$

где $A(\omega) = K_{10} \cdot [(1 + K_{20} - \tau_0^2 \omega^2) \cdot (1 + \varphi + K_{K0}) - 2(1 + \varphi) \tau_0 \tau_K \omega^2]$;

$B(\omega) = K_{10} \cdot [2(1 + \varphi + K_{K0}) \tau_0 \omega + (1 + \varphi) \cdot (1 + K_{20} - \tau_0^2 \omega^2) \tau_K \omega]$;

$C(\omega) = [(1 + K_{K0}) - \varphi K_{10} (1 + K_{20})] - [6(1 + K_{K0}) \tau_0^2 + 4 \tau_0 \tau_K - \varphi K_{10} (\tau_0^2 + 2 \tau_0 \tau_K)] \omega^2 +$
 $+ [(1 + K_{10}) \tau_0^4 + 4 \tau_0^3 \tau_K] \omega^4$;

$D(\omega) = [4(1 + K_{K0}) \tau_0 + \tau_K - \varphi K_{10} (2 \tau_0 + \tau_K + K_{20} \tau_K)] \omega -$
 $- [4(1 + K_{10}) \tau_0^3 + 6 \tau_0^2 \tau_K - \varphi K_{10} \tau_0^2 \tau_K] \omega^3 + \tau_0^4 \tau_K \omega^5$.

На рис. 4 приведены логарифмические амплитудные частотные характеристики объединённой системы (сплошная линия) и основной системы (пунктирная линия) при отсутствии вариации параметров. Значения большинства параметров взяты произвольно и не противоречат условиям алгоритма оптимального синтеза основной системы. Однако следует подчеркнуть, что для выбора значения постоянной времени корректирующей системы какие-либо критерии отсутствуют, поэтому требуется провести дополнительный анализ её влияния на качество объединённой системы.

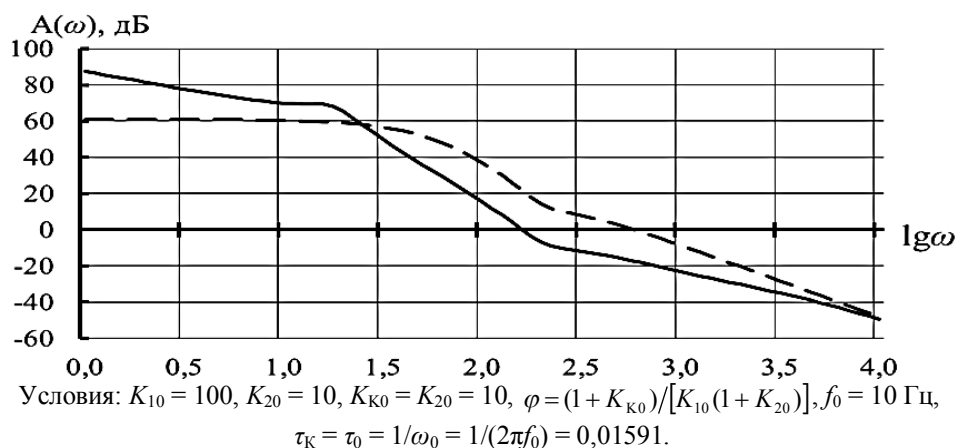


Рисунок 4 – Логарифмические амплитудные частотные характеристики объединённой и основной систем

Частотная характеристика объединённой системы в области низких частот имеет наклон 20 дБ/декаду, что подтверждает наличие астатизма первого порядка. Качество переходного процесса определяется видом частотной характеристики в окрестности частоты среза, где характеристика пересекает ось $\lg \omega$. Видно, что формы частотных характеристик систем в этой области несколько различаются, и из этого можно сделать вывод о различиях качества переходных процессов, что является предметом исследования следующей статьи.

Для случая, когда $\Delta K = \pm 10\%$ ($K_{10} = 100 \pm 10$), логарифмические амплитудные частотные характеристики объединённой системы приведены на рис. 5 слева – пунктирная и точечная линии. Там же для сравнения показана характеристика объединённой системы для $\Delta K = 0$ (сплошная линия – копия из рис. 4). Пунктирная и точечная характеристики, соответствующие условию $\Delta K = \pm 10\%$, практически совпадают друг с другом, а в областях средних и высоких частот различия всех трёх характеристик пренебрежимо малы. Более детально представим эту область в диапазоне $1,5 \leq \lg \omega \leq 3,0$ на рис. 5 справа.

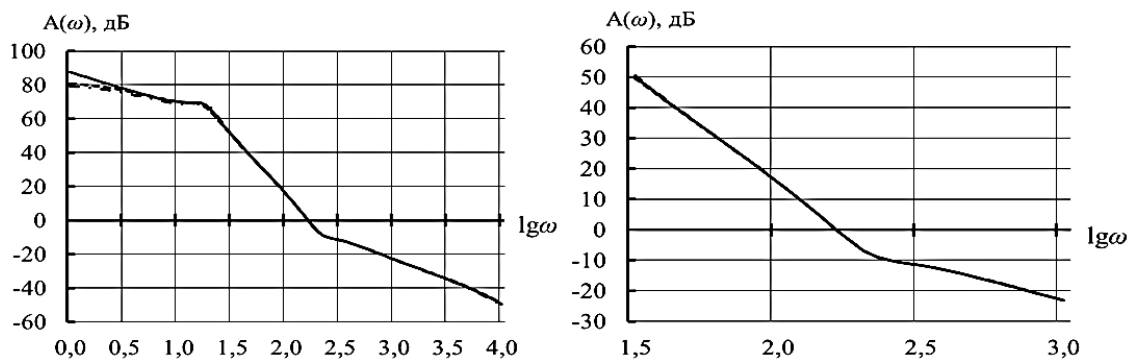


Рисунок 5 – Логарифмические амплитудные частотные характеристики объединённой системы при вариациях параметра K_{10}

Из рис. 5 видно, что в области частоты среза ($\lg \omega_{\text{ср}} \approx 2,2$) наклон частотных характеристик резко меняется, а поскольку эта область определяет условия устойчивости системы, то для детального анализа следует привлечь фазовые частотные характеристики (рис. 6).

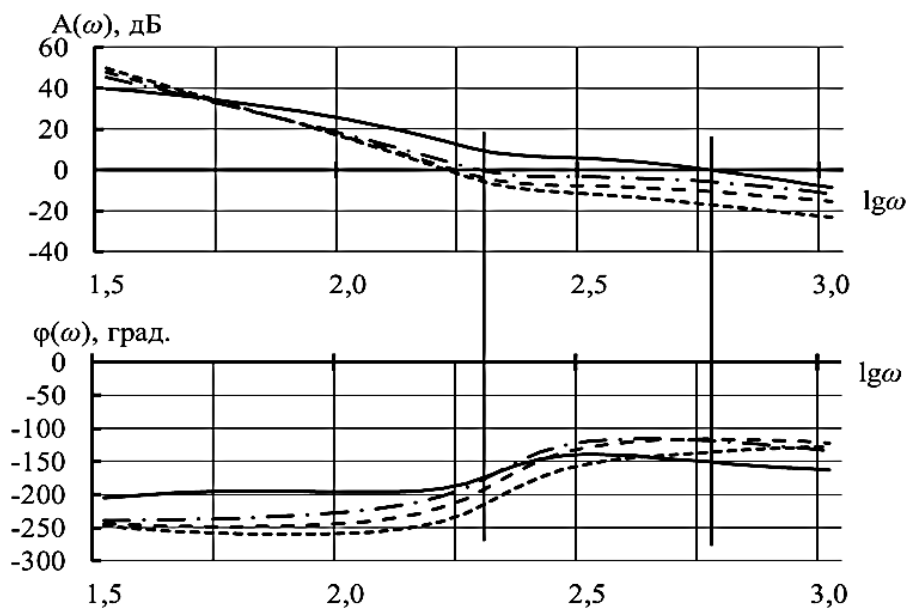


Рисунок 6 – Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики объединённой системы в области средних и высоких частот

На рис. 6 представлены четыре пары частотных характеристик в частотном диапазоне $1,5 \leq \lg \omega \leq 3,0$ для следующих значений постоянной времени τ_K : $\tau_K = \tau_0 = 0,01591$; $\tau_K = 0,05$; $\tau_K = 0,1$; $\tau_K = 0,5$ и значений других параметров: $K_{10} = 100$; $K_{20} = 10$; $K_{K0} = K_{20} = 10$; $\varphi = 0,01$; $f_0 = 10$ Гц; $\tau_0 = 0,01591$. Точечные линии - для $\tau_K = 0,01591$; пунктирные линии - для $\tau_K = 0,05$; штрих-пунктирные линии - для $\tau_K = 0,1$; сплошные линии - для $\tau_K = 0,5$.

Из анализа характеристик рис. 6 следует, что устойчивой будет система с $\tau_K = 0,5$, при этом измеренные в точках, отмеченных вертикальными линиями, запасы устойчивости равны: по модулю ≈ 11 дБ, по фазе ≈ 30 градусов.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1) применение корректирующей системы в составе объединённой позволяет уменьшить статическую ошибку основной системы при условии, что вариабелен только статический коэффициент передачи K_{10} ;

2) имеет место высокая чувствительность качества (в первую очередь устойчивости) объединённой системы к вариациям постоянной времени корректирующей системы;

3) проектирование систем со структурой (рис. 1) целесообразно и эффективно в случаях, когда условия их эксплуатации не оказывают существенного влияния на параметры корректирующей системы.

Список литературы

1. Парамзин А.П. Компенсация ошибок по скорости и ускорению в астатических системах // Вестник ВКГТУ. - 2015. - № 1. - Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2015. - С. 54-57.
2. Парамзин А.П. Compensation errors high order in automatic systems with active correction // Материалы IX Междунар. конф. «Эффективное использование ресурсов и охрана окружающей среды - ключевые вопросы развития горно-металлургического комплекса» и XII Междунар. науч. конф. «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», 20-23 мая 2015 г. - Усть-Каменогорск, 2015. - Ч. 2. - С. 415 - 421.
3. Парамзин А.П. Оптимизация частотных характеристик в замкнутых системах аддитивной коррекции по входу / А.П. Парамзин, В.М. Сергеев // Сб. науч. тр. «Проблемы научно-технического прогресса и экологии в строительстве и других отраслях экономики Казахстана». - Усть-Каменогорск: ВКТУ, 1998. - С.142-154.
4. Парамзин А.П. Общая теория систем аддитивной коррекции по входу / А.П. Парамзин, В.М. Сергеев, В.И. Чуфистов // Материалы Респ. конф. «Структурные методы повышения точности, чувствительности и быстродействия измерительных приборов и систем». - Киев, 1980.

Получено 12.08.2016

УДК 669.534.537.539

С.В. Плотников, Д.К. Ескермесов, Н.К. Ердыбаева

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

А.Д. Погребняк

Сумский государственный университет, г. Сумы

СТРУКТУРА, МОРФОЛОГИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕТНОГО ПОКРЫТИЯ (Ti-Zr-Nb)N, ПОЛУЧЕННОГО ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

В процессе эксплуатации поверхностный слой деталей машин и механизмов подвергается сильному механическому, тепловому и химическому воздействию. Потеря работоспособности в большинстве случаев происходит с поверхности в результате изнашива-

ния, эрозии, коррозии и т. п. Значительный ресурс повышения работоспособности заключен в материале, из которого изготавливаются детали. По этой причине триботехническому материаловедению в современном машиностроении уделяется все более пристальное внимание. Применение для этих целей объемно-легированных материалов часто экономически невыгодно, а в ряде случаев технологически невозможно. Однако необходимых результатов можно достигнуть путем нанесения на рабочие поверхности многофункциональных покрытий, которые объединяют в себе одновременно высокую твердость, износостойкость и теплостойкость. Одними из наиболее изученных и широко используемых являются покрытия из нитридов, карбидов и карбонитридов титана толщиной 5-10 мкм [1-4]. Однако возможности повышения твердости и пластичности поверхностного слоя при нанесении простых нитридов практически исчерпаны, поскольку уже при температурах в 400-500 °С карбиды и нитриды титана термически нестабильны. Для обеспечения комплекса высоких эксплуатационных свойств весьма перспективным является применение многоэлементных покрытий, полученных при помощи трех- (Ti-Nb-N, Ti-Cr-N, Zr-Ti-N [5 - 8]), четырех- (Zr-Ti-Si-N) [9, 10] или пятикомпонентных систем (Zr-Nb-Ti-Cr-N) [11, 12]. Структура и свойства, а также возможности термической стабилизации фазового состава таких легированных конденсатов пока изучены мало. Стабильность структуры и состава, а также высокие эксплуатационные характеристики многоэлементных нитридных систем обеспечивают совершенствование физико-механических характеристик поверхности и применение их в качестве защитных пленок, препятствующих попаданию вредных примесей в приповерхностные слои изделий [13, 14]. В настоящее время наибольшее распространение получили ионно-плазменные методы осаждения покрытий, в частности вакуумно-дуговое и магнетронное распыление [15, 16]. Комплекс физических и механических свойств чистых металлов, таких, как цирконий, ниобий, титан, молибден, хром, позволяет предположить целесообразность исследования вакуумно-плазменных конденсатов на основе системы Ti-Zr-Nb. Это, в свою очередь, позволяет создать защитный слой (или покрытие) на основе четырех элементов (трех переходных металлов и азота как связующего элемента).

В работе изучены особенности формирования ионно-плазменных покрытий путем распыления многоэлементной системы на основе Ti+Zr+Nb и осуществлен анализ физико-механических свойств полученных покрытий. Покрытия формировались методом вакуумно-дугового осаждения. В качестве испаряемых материалов использовались цельнолитые мишени (катоды) на основе системы: 30 ат. % Ti, 35 ат. % Zr и 35 ат. % Nb. Толщина всех покрытий в экспериментах составляла 5,0 мкм. Распыление покрытий производилось при давлении рабочего газа (молекулярного азота) $3 \cdot 10^{-4}$, $7 \cdot 10^{-4}$ и $4 \cdot 10^{-3}$ Торр (покрытия серии а, б и в соответственно). В качестве подложек для напыления покрытий были выбраны образцы размером 15x15x2,5 мм из стали 12X18H9T с шероховатостью исходной поверхности $R_a \approx 0,09$ мкм. Параметры осаждения, а также шероховатость поверхности после распыления покрытия приведены в табл. 1.

Таблица 1

*Технологические параметры распыления и шероховатость
поверхности покрытий (Ti-Zr-Nb)N*

Серия	Ток дуги I_d , А	Напряжение смещения $U_{см}$, В	Давление азота P_N , Торр	Шероховатость R_a , мкм
а	95	100	$3 \cdot 10^{-4}$	1,17
б	95	100	$7 \cdot 10^{-4}$	0,54
в	95	100	$4 \cdot 10^{-3}$	0,42

Морфология поверхности, фрактограммы излома и дорожки трения исследовались на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV. Элементный состав покрытий анализировался по спектрам характеристического рентгеновского излучения с помощью встроенного в микроскоп энергодисперсионного спектрометра рентгеновского излучения системы INCA Energy Penta FET X3(OXFORD). Рентгеноструктурные исследования образцов с покрытиями проводились на дифрактометре ДРОН-4 в CuK_α -излучении в поточечном режиме с шагом сканирования $2\theta=0,05$ град.

Микротвердость покрытий измерялась на автоматизированном твердомере модели Durascan-20 (Швейцария) при нагрузке на индентор 0,05 Н. Адгезионно-когезионная прочность, стойкость к царапанию и механизм разрушения покрытий исследовались на воздухе с помощью скретч-тестера Revetest (Instruments).

Трибологические испытания проводились на воздухе по схеме «шарик-диск» на машине трения «Tribometer» (CSM Instruments). В качестве контртела использовался шарик диаметром 6,0 мм, изготовленный из спеченного сертифицированного материала - Al_2O_3 . Нагрузка составляла 3,0 Н, скорость скольжения - 10 см/с. Условия проведения испытаний соответствовали международным стандартам ASTM G99-959, DIN50324 и ISO 20808.

Шероховатость, а также объем удаленного материала покрытия определяли по сечению дорожки износа на поверхности образца с помощью автоматизированного прецизионного контактного профилометра модели Surtronic 25. Строение бороздки износа покрытия и пятна износа на шариках исследовались на оптическом инвертированном микроскопе Olympus GX 51 и растровом ионно-электронном микроскопе Quanta 200 3D. В результате проведенных испытаний оценивали фактор износа [17] образца с покрытием и статистического партнера (шарика) по методике [18]:

$$W = \frac{V}{Pl},$$

где W - фактор износа, $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$; V - объем удаленного материала, мм^3 ; P - нагрузка, Н; l - путь трения, м.

Диаметр износа шарика определялся с помощью оптического инвертированного микроскопа Olympus GX 71, объем удаленного материала на шарике рассчитывался как

$$V = \pi h^2 \left(r - \frac{1}{3}h \right),$$

где $h = r - \sqrt{r^2 - (d/2)^2}$ - высота сегмента; d - диаметр износа; r - радиус шарика.

Объем удаленного материала покрытия равен $V_{\Pi} = sl_{\Pi}$, где l_{Π} - длина окружности, s - площадь поперечного сечения дорожки износа.

Изображение поверхности покрытий, а также фрактограммы излома приведены на рис. 1, 2, данные по изменению шероховатости (среднеарифметическое отклонение профиля R_a) покрытий - в табл. 1.

Изучение морфологии поверхности показывает, что увеличение давления реакционного газа (азота) в рабочей камере приводит к уменьшению количества и размера макрочастиц, что особенно существенно при наличии в вакуумной камере активных газов, образующих с испаряемым материалом тугоплавкие соединения [19]. При этом также наблюдается снижение шероховатости покрытия.

Данные об элементном составе покрытий представлены в табл. 2. Как видно, содержание азота и ниобия в образцах серии б и в практически одинаково, однако в образцах, полученных при более высоком давлении азота (серия в), содержание циркония выше, а титана - ниже, чем в образцах серии б. Повышение содержания титана в покрытиях серии б связано, по-видимому, с более эффективным взаимодействием атомов титана с азотом в приповерх-

ностной области. В основе такого предположения лежат обобщенные в работе [19] данные об образовании нитридных комплексов в поверхностной области при осаждении переходных металлов в азотной атмосфере. Среди таких комплексов наиболее устойчивым является Ti-N. Образование устойчивых нитридных комплексов значительно уменьшает эффективность их распыления с растущей поверхности (вторичного распыления), что в итоге приводит к ее обогащению сильным нитридообразующим элементом (в данном случае Ti).

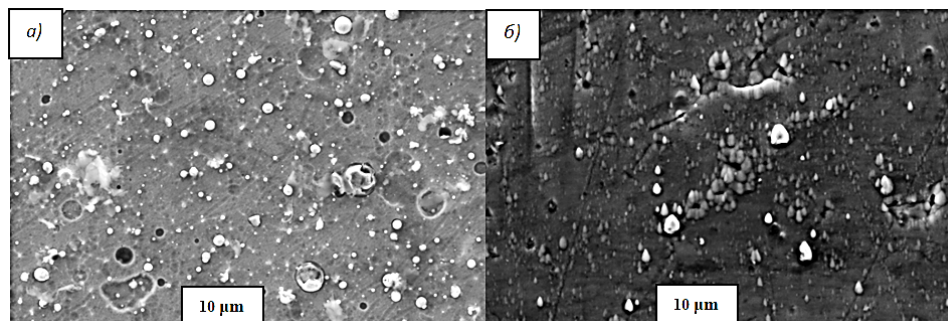


Рисунок 1 - Поверхность покрытий (Ti-Zr-Nb)N, полученных при парциальном давлении азота:
а) давление азота при осаждении $P=3 \cdot 10^{-4}$ Торр, шероховатость поверхности $R_a=1,17$ мкм;
б) $P=4 \cdot 10^{-3}$ Торр, $R_a=0,42$ мкм

Таблица 2

Элементный состав покрытий (Ti-Zr-Nb)N, ат. %

Серия	N	Ti	Zr	Nb
<i>a</i>	38,72	20,91	20,38	19,99
<i>б</i>	40,00	22,57	18,04	19,39
<i>в</i>	40,86	20,52	19,36	19,26

На рис. 2 представлены РЭМ-изображения поперечного сечения полученных покрытий при разных давлениях азота. Толщина покрытий на всех образцах (сериях) составила 5,0 мкм.

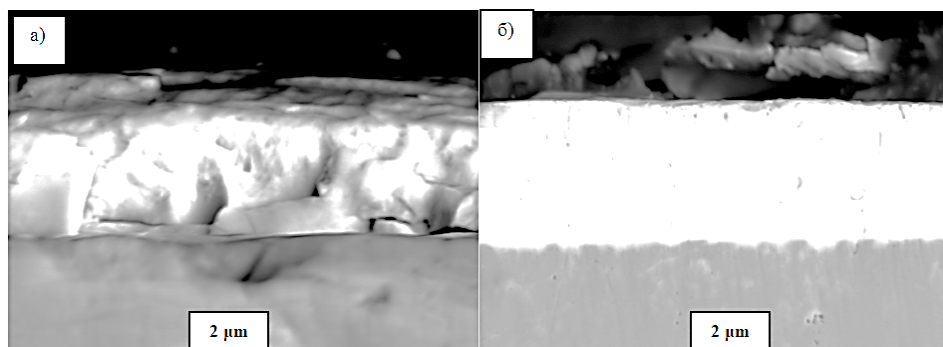


Рисунок 2 - РЭМ-изображение поперечного сечения покрытий (Ti-Zr-Nb)N, полученных при парциальном давлении азота: а) $P=3 \cdot 10^{-4}$ Торр; б) $P=4 \cdot 10^{-3}$ Торр

Анализ фрактограмм излома покрытий, полученных при разном парциальном давлении азота, свидетельствует о формировании столбчатой структуры, характерной для покрытий, полученных методом вакуумно-дугового распыления (рис. 3).

Из представленных на рис. 4 дифрактограмм следует, что покрытие имеет ГЦК структуру, однако слабый пик в области $2\theta=38^\circ$ свидетельствует о наличии мелких включений с ОЦК решеткой, характерной для капельной фазы, образующейся при вакуумно-дуговом распылении покрытий [20]. С ростом давления реакционного газа интенсивность этого пика снижается, вероятно, из-за значительного уменьшения содержания капельной фазы в покрытии, что коррелирует с результатами исследований шероховатости поверхности покрытий, полученных при разных давлениях (рис. 1). Детальный анализ элементного состава капельной фазы вакуумно-дуговых нитридных покрытий [15] показал, что состав капельной фазы при вакуумно-дуговом методе испарения соответствует расплаву испаряемой металлической мишени. С другой стороны, в [3] показано, что многоэлементные металлические расплавы из подобных 3d-элементов при кристаллизации образуют обобщенную ОЦК решетку замещения. Поэтому выявляемые пики, соответствующие ОЦК решетке, естественно связать с образующейся при осаждении капельной фазой, которая кристаллизуется с образованием ОЦК решетки замещения из металлических атомов (Ti, Zr, Nb).

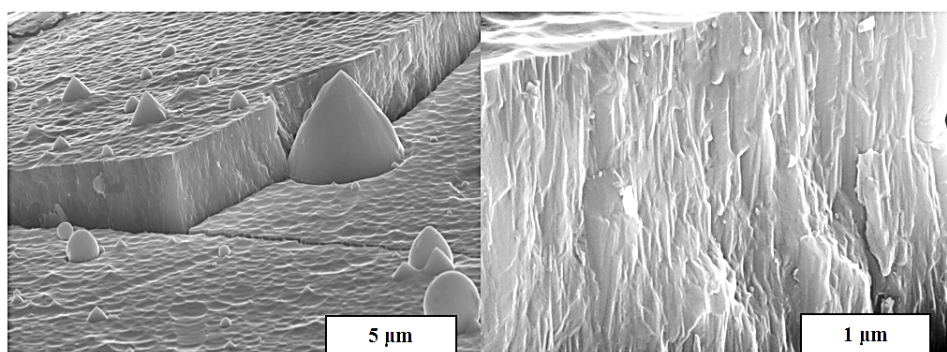


Рисунок 3 – РЭМ-изображение фрактограммы излома (Ti-Zr-Nb)N покрытия, осажденного при давлении азота $P=4\cdot 10^{-3}$ Торр, при разном увеличении

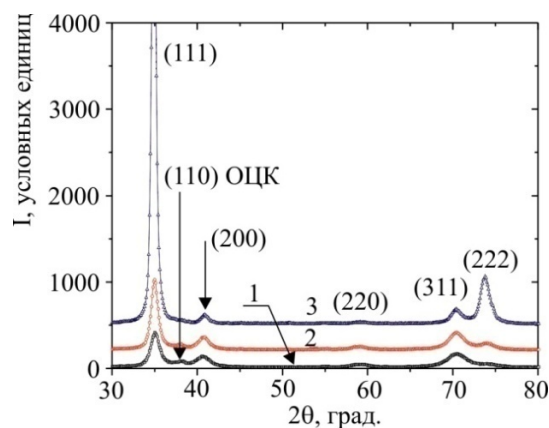


Рисунок 4 - Дифрактограммы покрытий, полученных при разных парциальных давлениях азота:

1) $P = 3\cdot 10^{-4}$ Торр (серия а); 2) $P = 7\cdot 10^{-4}$ Торр (серия б); 3) $P = 4\cdot 10^{-3}$ Торр (серия в).

Индексы плоскостей без обозначения относятся к ГЦК фазе (Ti-Zr-Nb)N,
а индексы ОЦК – к фазе (Ti-Zr-Nb)

При увеличении давления реакционного газа также наблюдается заметное усиление относительной интенсивности дифракционных пиков от семейства плоскостей (111) ку-

бической ГЦК решетки нитридной фазы (Ti-Zr-Nb)N покрытия, что свидетельствует о повышении совершенства преимущественной ориентации роста кристаллитов с осью (111), перпендикулярной плоскости поверхности.

Определенные методом аппроксимации размеры кристаллитов с увеличением давления азота возрастают от 10 нм (при наименьшем давлении $3 \cdot 10^{-4}$ Торр) до 63 нм - при наибольшем давлении $4 \cdot 10^{-3}$ Торр.

Результаты исследования адгезионно-когезионной прочности и стойкости покрытий к царапанию приведены на рис. 5, 6.

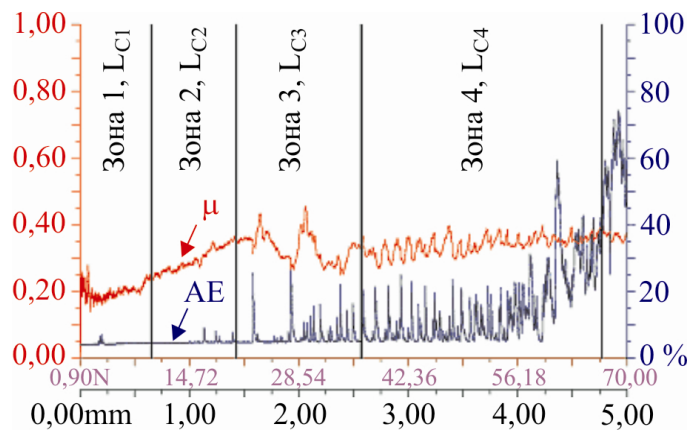


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента трения и сигнала акустической эмиссии от приложенной нагрузки при скрэтч-тестировании покрытия (Ti-Zr-Nb)N, полученного при давлении азота $P = 4 \cdot 10^{-3}$ Торр

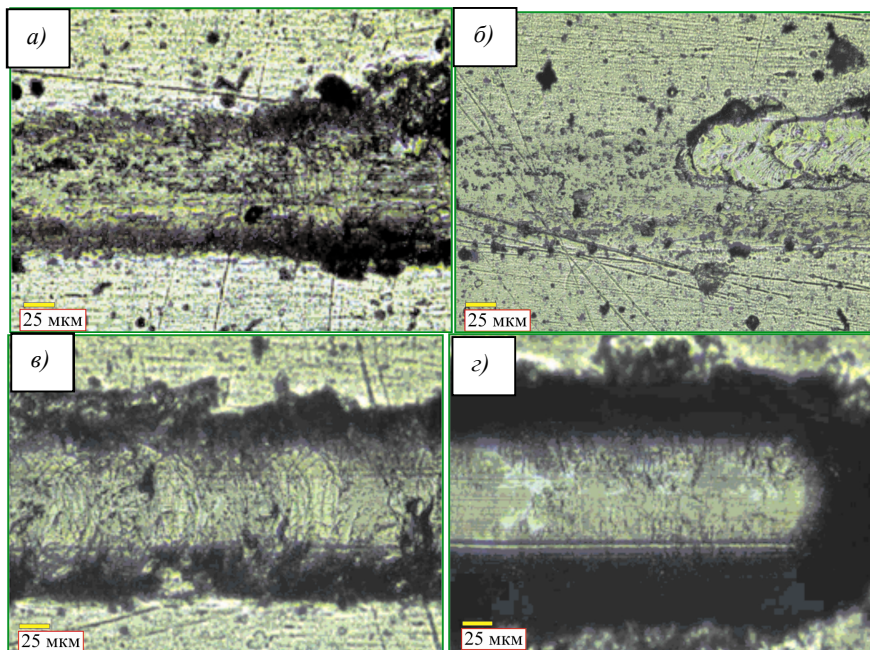


Рисунок 6 – Микрофотографии зоны контакта алмазного индентора с покрытием (Zr-Ti-Nb)N (образец серии в): а) зона 1; б) зона 2; в) - зона 3; г) зона 4

По изменению значений коэффициента трения и сигнала акустической эмиссии при увеличении нагрузки скрайбирования (рис. 5) определялись характерные значения критической нагрузки L_C : L_{C1} - появление первой шевронной трещины на дне и диагональной трещины по краям царапины; L_{C2} - образование множества шевронных трещин на дне царапины и локальное отслаивание покрытия, образование шевронных трещин на дне царапины; L_{C3} - когезионно-адгезионное разрушение покрытия; L_{C4} - пластичное истирание покрытия. За критерий адгезионной прочности было принято значение критической нагрузки L_{C4} , при которой происходит истирание покрытия.

В соответствии с этими критериями процесс разрушения покрытия при царапании индентором можно условно разделить на четыре стадии. В диапазоне нагрузок от $F=0,9$ до $9,89$ Н происходит монотонное проникновение индентора в покрытие, при этом коэффициент трения незначительно возрастает, а сигнал акустической эмиссии сохраняется неизменным. При нагрузке $F=15,81$ Н индентор полностью погружается в покрытие, а скольжение алмазного индентора по покрытию происходит с коэффициентом трения $0,35$. При увеличении нагрузки ($F = 20,6 \div 36,4$ Н) происходит выдавливание материала перед индентором в виде бугорков и увеличение глубины проникновения индентора.

В табл. 3 представлены результаты адгезионных испытаний образцов полученных покрытий (Zr-Ti-Nb)N и там же для сравнения приведены полученные ранее аналогичные данные для покрытий (Ti-Zr-Si)N и TiN [21]. Согласно [22] при истирании образца во время тестирования на адгезионную прочность наиболее информативными характеристиками адгезионного разрушения являются критические значения нагрузки L_C . Как видно из табл. 3, результаты адгезионных испытаний покрытий системы (Zr-Ti-Nb)N серии *в* при давлении реакционного газа $P=4 \cdot 10^{-3}$ Торр достигают максимального значения $66,77$ ГПа. Как известно, наиболее универсальным параметром, позволяющим достаточно быстро оценить механические свойства покрытия, является его микротвердость [19, 20]. Результаты таких измерений для покрытий (Zr-Ti-Nb)N приведены в табл. 4. Как видно, максимальная твердость $HV=44,57$ ГПа достигается при давлении реакционного газа $P=4 \cdot 10^{-3}$ Торр, и, согласно классификации [23], такие покрытия можно отнести к сверхтвердым ($HV_{0,05} \geq 40$ ГПа).

Таблица 3

Сравнительные результаты адгезионных испытаний покрытий системы (Zr-Ti-Nb)N и (Ti-Zr-Si)N, TiN

Критические нагрузки	Покрyтия				
	(Zr-Ti-Nb)N, серия <i>a</i>	(Zr-Ti-Nb)N, серия <i>б</i>	(Zr-Ti-Nb)N, серия <i>в</i>	(Ti-Zr-Si)N [21]	TiN [21]
L_{C1}	2,91	0,9	9,89	3,91	21,31
L_{C2}	29,04	15,82	20,62	18,15	30,91
L_{C3}	43,18	42,37	36,43	24,29	40,28
L_{C4}	59,26	66,24	66,77	43,15	48,84

Таблица 4

Средние значения микротвердости покрытий на основе системы (Zr-Ti-Nb)N

Серия	Твердость, $HV_{0,05}$ ГПа
<i>a</i>	37,21
<i>б</i>	40,21
<i>в</i>	44,57

Важными параметрами, определяющими работоспособность покрытия, также являются его трибологические характеристики (коэффициент трения и фактор износа). Коэффициент трения μ определяет силу сцепления трущихся материалов, а фактор износа - стойкость к износу (чем меньше фактор износа, тем выше износостойкость). Коэффициент трения принимает значения от начального (во время первого контакта), до стационарного (столбец «при испытаниях» в табл. 5) - при выходе на постоянные значения при испытаниях.

Таблица 5
Триботехнические характеристики покрытий системы «покрытие (Zr-Ti-Nb)N - Al_2O_3 »

Серия	Коэффициент трения, μ		Фактор износа, $mm^3 \cdot H^{-1} \cdot m^{-1}$	
	Начальный	При испытаниях	Контртело ($\cdot 10^{-5}$)	Образца ($\cdot 10^{-5}$)
<i>a</i>	0,61	1,95	0,391	9,69
<i>b</i>	0,45	1,19	2,84	3,1
<i>в</i>	0,491	1,05	3,21	2,4

На всех образцах с покрытием (серии *a*, *b*, *в*) коэффициент трения оказался выше 1,0. Столь высокие значения можно объяснить высокой шероховатостью (рис. 1), связанной с наличием на поверхности и в покрытии капельной фракции, образующейся при вакуумно-дуговом распылении. Появление твердой капельной составляющей, а также образование при разрушении покрытия продуктов износа в виде частиц, состоящих из твердых нитридов, приводит к абразивному изнашиванию покрытия. Уменьшение шероховатости снижает коэффициент трения с 1,95 до 1,05. С повышением твердости покрытия фактор изнашивания W покрытия уменьшается, а контртела - увеличивается (табл. 5). С увеличением давления и появлением преимущественной ориентации роста кристаллитов с оси (111) (рис. 2) наблюдается уменьшение схватывания и износа материала, что коррелирует с установленным ранее повышением твердости с увеличением давления азота при осаждении покрытия. Полученные результаты можно объяснить повышением плотности упаковки атомов в плоскости (111) ГЦК решетки [20], что увеличивает твердость покрытия, так как внедрение индентора при оси текстуры в покрытие (111) происходит перпендикулярно этим плоскостям. Повышение стойкости к износу в этом случае определяется тем, что в процессе изнашивания происходит послойное удаление более твердых плоскостей (111) материала, что минимизирует его разрушение.

Итак, методом вакуумно-дугового распыления цельнолитого катода в среде реакционного газа азота получены многокомпонентные покрытия системы (Ti-Zr-Nb)N с явно выраженной столбчатой структурой. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что покрытия, полученные при выбранных параметрах осаждения, имеют толщину покрытия 5 мкм. Наиболее высокую микротвердость 44,6 ГПа и стойкость к износу показали покрытия, полученные при максимальном давлении азота. Напряжение адгезионного разрушения таких покрытий достигают 66,8 ГПа.

Список литературы

1. A.D. Pogrebnjak, A.P. Shpak, N.A. Azarenkov, B.M. Beresnev. Struktura i svoistva tverdykh i sverhtverdykh nanokompositnykh pokritii // UFNA. - 2009. - № 1. - S. 35-64.
2. A.D. Pogrebnjak. Structure and Properties of Nanostructured (Ti-Hf-Zr-V-Nb)N Coatings// J. of Nanomaterials. - V. 2013. - Article ID 780125. - P.12.
3. N.A. Azarenko, O.V. Sobol', B.M. Beresnev, A.D. Pogrebnjak, D.A. Kolesnikov, P.V. Turbin, I.N. Toryanik. Vakuumno-plazmennye pokritii na osnove mnogoelementnykh nitridov // Metallofizika noveishie tehnologii. - 2013. - Т. 35.- № 8. - P. 1001-1024.

4. A.D. Pogrebnjak, V.M. Beresnev, A.A. Demianenko, V.S. Baidak, F.F. Komarov, M.V. Kaverin, N.A. Makhmudov, D.A. Kolesnikov. Adhesive strength, superhardness, and the phase and elemental compositions of nanostructured coatings based on Ti-Hf-Si-N // *Physics of the Solid State*. – 2012. – Vol. 54. – Is. 9. – P. 1882-1890.
5. Han J.G., Myung H.S., Lee H.M., Shaginyan L.R. Microstructure and mechanical properties of Ti-Ag-N and Ti-Cr-N superhard nanostructured coatings // *Surf. Coat. Technol.* – 2003. – P. 174-175; 738-743.
6. Hasegawa Hiroyuki, Kimura Ayako, Suzuki Tetsuya. Microhardness and structural analysis of (Ti,Al)N, (Ti,Cr)N, (Ti,Zr)N and (Ti,V)N films // *J. Vac. Sci. Technol. A*. – 2000. – 18, № 3. – P. 1038-1040.
7. Lee Jyh-Wei, Chang Shih-Tien, Chen Hsien-Wei et al. Microstructure, mechanical and electrochemical properties evaluation of pulsed DC reactive magnetron sputtered nano-structured Cr-Zr-N and Cr-Zr-Si-N thin films // *Surf. Coat. Technol.* – 2010. – 205, № 5. – P. 1331-1338.
8. Slokar L., Matković T., Matković P. Alloy design and property evaluation of new Ti-Cr-Nb alloys // *Mater. Design*. – 2012. – 33. – P. 26-30.
9. Соболев О.В. Влияние условий получения на фазовый состав, структуру и механические характеристики вакуумно-дуговых покрытий системы Zr-Ti-Si-N / О.В. Соболев, А.Д. Погребняк, В.М. Береснев // *Физика металлов и металловедение*. – 2011. – 112. – № 2. – С. 199-206.
10. Beresnev V.M., Sobol' O.V., Pogrebnjak A.D. et al. Thermal stability of the phase composition, structure, and stressed state of ion-plasma condensates in the Zr-Ti-Si-N system // *Techn. Phys.* – 2010. – 55, № 6. – P. 871-873.
11. Tsau Chun-Huei, Chang Yu-Hsin. Microstructures and Mechanical Properties of TiCrZrNbNx Alloy Nitride Thin Films // *Entropy*. – 2013. – 15, № 11. – P. 5012-5021.
12. Krause-Rehberg R., Pogrebnjak A.D., Borisyuk V.N. et al. Analysis of local regions near interfaces in nanostructured multicomponent (Ti-Zr-Hf-V-Nb)N coatings produced by the cathodic-arc-vapor-deposition from an arc of an evaporating cathode // *Phys. Met. Metallogr.* – 2013. – 114, № 8. – P. 672-680.
13. S. Veprek, M.G.L. Veprek-Hejman, P. Karvankova, J. Prohazka. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites // *Thin Solid Films*. – 2005. – V. 476. – S. 1-29.
14. J. Musil, P. Baroch, P. Zeman. Hard nanocomposite coatings. Present Status and Trends // in Book Edit. R Wei «Plasma Surface Engineering Research And Its Practical Applications». Kerala Research Signpost Publ. – 2008. – S. 1-34.
15. A.A. Andreev, L.P. Sablev, S.N. Grigorev. Vakuumno-dugovie pokrytiya // *NNC HFTI*. – 2010. – P. 317.
16. E.V. Berlin, L.A. Seidman. Ionno-plazmennye processy v tonkoplennatoy tehnologii // *Tehnosphera*. – 2010. – S. 528.
17. Вершинин Д.С. Исследование трибологических свойств азотированного титанового сплава BT16 с использованием автоматизированной машины трения / Д.С. Вершинин, М.Ю. Смолякова, С.С. Манохин и др. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2010. – Т. 76. – № 12. – С. 45-49.
18. N. Randall. Overview of mechanical testing standards // *Ed. CSM Instruments Applications Bulletin*. – 2002. – № 18. – P. 3. – <http://www.csm-instruments.com/en/tests-Standards>.
19. Аксенов И.И. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование / И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус и др. // Киев: «Наукова думка». – 2012. – С. 727.
20. Азаренков Н.А. Металловедение неравновесного состояния модифицированной поверхности / Н.А. Азаренков, О.В. Соболев, В.М. Береснев и др. – Сумы: СумГУ. – 2013. – С. 683.
21. Pogrebnjak A.D., Yakushchenko I.V., Bagdasaryan A.A., Bondar O.V., Krause-Rehberg R., Abadias G., Chertier P., Oyoshi K., Takeda Y., Beresnev V.M., Sobol O.V. Microstructure, physical and chemical properties of nanostructured (Ti-Hf-Zr-V-Nb)N coatings under different deposition conditions // *Mater. Chem. Phys.* – 2014. – V. 147, iss. 3. – P. 1079-1091.
22. Valli J. A review of adhesion test methods for thin hard coatings // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1986. – V. A4. – P. 3007-3014.
23. Азаренков Н.А. Наноструктурные покрытия наноматериалы. Основы получения, свойства, область и применения / Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк и др. // М.: Либриком. – 2013. – С. 368.
24. Береснев В.М. Физико-механические свойства покрытий (Ti-Zr-Nb)N, полученных методом вакуумно-дугового испарения / В.М. Береснев, О.В. Соболев, С.С. Гранкин и др. // *Физика и химия обработки материалов*. – 2015. – № 4. – С. 50-58.
25. Плотников С.В. Исследование физико-механических свойств высокоэнтропийных покрытий (Ti-Zr-Nb)N, полученных методом вакуумно-дугового осаждения / С.В. Плотников, А.Д. Погребняк, Д.К. Ескермесов и др. // *Материалы XII Междунар. науч. конф. «Перспек-*

тивные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов». – 2015. – С. 350–357.

Получено 3.08.2016

УДК 537.523/.527

С.В. Плотников, Е.О. Тлеукенов, Н.К. Ердыбаева

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск

А.Д. Погребняк

Сумский государственный университет, г. Сумы

**СТРУКТУРА И НАНОТВЕРДОСТЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО НАНОКОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ
(Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta)N, ПОЛУЧЕННОГО ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ ОСАЖДЕНИЕМ**

В последнее десятилетие выполнено много работ, посвящённых высокоэнтропийным сплавам (ВЭС), состоящим, как минимум, из пяти основных элементов с атомной концентрацией от 5 до 35%. Основная особенность ВЭС заключается в том, что в них формируется однофазный стабильный твердый раствор замещения, преимущественно с ГЦК-или ОЦК-решеткой, который одновременно является термодинамически устойчивым и высокопрочным [1-3]. Получение нитридов или карбидов из ВЭС также является весьма актуальной задачей современного материаловедения, поскольку вариативность элементного состава ВЭС, а также нитридов на их основе способствует получению ряда полезных свойств: высокотемпературной прочности, супермагнитных свойств, сопротивлению к износу и коррозии, высокой твёрдости наряду с хорошей пластичностью и другими улучшенными свойствами по сравнению с «чистыми» ВЭС [4-7].

Увеличение сроков эксплуатации промышленного оборудования, деталей установок, машин, режущего, сверлящего и других обрабатывающих инструментов всегда было актуальной задачей науки и техники. Во время усиленной экономии ресурсов и перехода на энергосберегающие технологии данный вопрос становится еще более острым. В процессе работы вышеупомянутых изделий наиболее сильной нагрузке, физико-механическому, химическому и термическому воздействию подвергается поверхностный слой. Одним из способов защиты и улучшения различных свойств поверхности является ее модификация с помощью формирования покрытий из наноструктурированных материалов. Малый (до 10 нм) размер зерен таких материалов и значительное увеличение объемного содержания межфазных границ позволяет достичь уникальных свойств [8, 9].

Стабильность структуры и состава, а также высокие эксплуатационные характеристики высокоэнтропийных систем создают весьма привлекательную возможность формирования на их основе покрытий с целью совершенствования характеристик поверхности или применения их в качестве защитных пленок, препятствующих попаданию вредных примесей в приповерхностные слои изделия (искажение кристаллической решетки твердого раствора замещения связано с наличием разнородных атомов с разными радиусами). Таким образом, в настоящей работе ставилась цель исследовать покрытия на основе высокоэнтропийного (Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta) сплава, поскольку при определенных условиях в покрытиях могут формироваться нанокompозитные структуры, которые могут обладать улучшенными механическими свойствами по сравнению с многокомпонентными покрытиями.

Покрывтия были получены методом вакуумно-дугового осаждения на установке «Булат-6» при испарении мишени из высокоэнтропийного сплава системы Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta в среде реакционного газа азота (N_2) на полированную поверхность подложек. Параметры осаждения приведены в табл. 1, где U - постоянный отрицательный потенциал смещения на подложке; P_N - давление азотной атмосферы при осаждении; ток дуги изменялся незначительно от 95 до 110 А, ток фокусировки - от 0,4 до 0,5 А. Значение U было выбрано (-70 и -200 В) на основе работ [10]. Исследования морфологии поверхности образцов после напыления проводились на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV с приставкой энергодисперсионного микроанализа INSA Energy.

Таблица 1

*Параметры осаждения и элементный состав исследуемых покрытий
(Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta)N*

Серия	U, V	P_N, Torr	Концентрация, at. %						
			N	Ti	Zr	Hf	V	Nb	Ta
1	-150	$3 \cdot 10^{-4}$	46	9,04	9,80	12,81	5,60	12,13	4,62
2	-200	$7 \cdot 10^{-4}$	36	16,60	16,85	8,79	6,95	9,92	4,89
3	-70	$3 \cdot 10^{-3}$	54	7,03	8,52	11,30	5,02	9,93	4,20
4	-150	$4 \cdot 10^{-3}$	55	10,76	7,71	8,06	5,85	8,38	4,24
Катод	-	-	-	21,52	18,77	15,5	10,2	18,2	15,81

В отличие от [11], где осаждались нитридные покрытия из пятиэлементного ВЭС, в настоящей работе был использован катод из шести элементов и применялся импульсный режим осаждения при подключении высоковольтного импульсного генератора [12], что позволило усилить энергию ионно-плазменного потока в момент осаждения, улучшить адгезию покрытия к подложке и получить более дисперсную структуру покрытия. Покрытия толщиной до 12 μm осаждались на стальные пластины (далее подложка) из материала сталь 40. Параметры подложки - $45 \times 45 \text{ мм}^2$ и толщиной - 4 мм.

Измерения микротвердости проводились на автоматизированном приборе Durascan-20 (Швейцария), а нанотвердость и модуль упругости исследовались в динамическом режиме на Triboindenter TI-950 (HYSITRON, Inc.). Для исследования топографии поверхности многокомпонентных покрытий использовался растровый электронный микроскоп JSM-6390 LV производства компании «JEOL Ltd.» (Япония) с энергодисперсионным спектрометром (микроанализ) INCA EnergyPenta FET X3 компании «OXFORD InstrumentsAnalyticalLimited» (Великобритания). Проведено изучение топографии и микроструктуры поверхности образца (в режиме низкого вакуума), качественный и количественный элементный микроанализ в точечной области, построение профилей распределения элементов вдоль заданной линии, построение карт распределения элементов на выбранном участке. Измерения проводились при низком вакууме и рабочем ускоряющем напряжении 30 kV.

Как известно, универсальной характеристикой, позволяющей оценить механические свойства покрытия, является твердость. На рис. 1 приведены соответствующие зависимости нанотвердости и приведенного модуля упругости E_r от глубины проникновения наноиндентора. Значение нанотвердости до глубины 20 nm постепенно растет и на этой глубине достигает максимального значения 28 GPa. Также следует отметить, что увеличение индекса пластичности в покрытии $H/E \geq 0,1$ указывает на превосходную стойкость к износу. В работе Фенга Х. [13] также было отмечено, что после напыления значение

нанотвердости существенно увеличилось для нитридных соединений высокоэнтропийного сплава (Zr,Ta,Nb,Ti,W)N.

Из табл. 1 видно, что повышение давления от $3 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ Торг приводит к значительному повышению концентрации азота в составе покрытия. При этом режиме содержание металлических элементов, таких, как Ti, Nb, V, уменьшается.

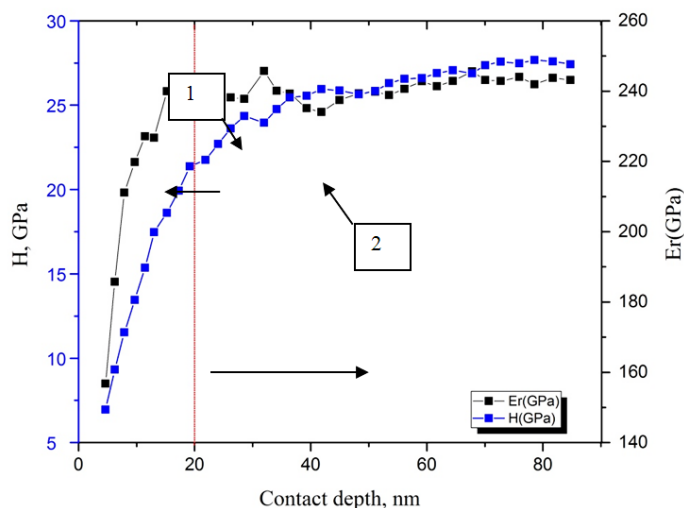


Рисунок 1 – Зависимость нанотвердости (1) и приведенного модуля упругости (2) от глубины проникновения наноиндентора

На рис. 2 представлено РЭМ-изображение одного из полученных покрытий (серия 1). Рис. 2,а с разрешением 10 мкм представляет собой морфологию поверхности покрытия, а рис. 2,б с разрешением 5 мкм - поперечное сечение. Видно, что поверхность и поперечное сечение покрытия имеют неравномерности. После нанесения покрытия на подложку формируется характерная для оплавления поверхность (рис. 2,а).

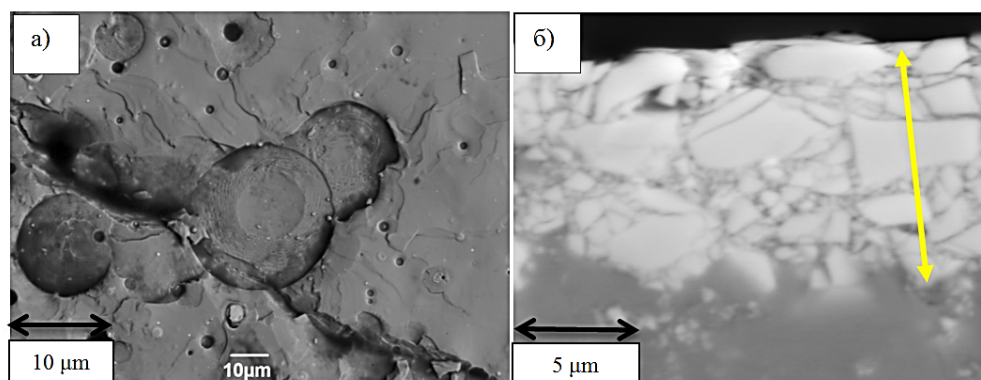


Рисунок 2 – РЭМ-изображение покрытий (Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta)N:
а) морфология поверхности; б) толщина слоя при поперечном сечении

Процесс образования ямок на поверхности пленки был предположительно связан с формированием микрократеров, которые приведены на рис. 3,а с разрешением 50 мкм и 3,б с разрешением 5 мкм. На рис. 3,в с разрешением 10 мкм видны области с микротрещинами, длина которых в среднем равна 20 мкм. Также наблюдаются небольшие капель-

ные фракции размером 5 мкм и меньше. Рис. 3,_г показывает отдельную капельную фракцию при разрешении 1 мкм.

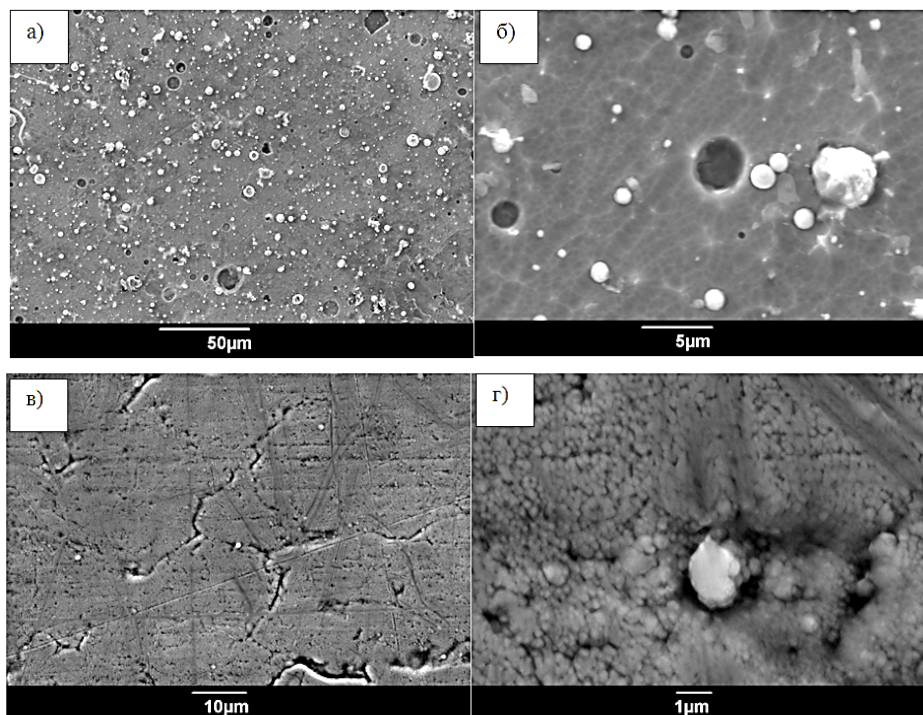


Рисунок 3 – РЭМ-изображение покрытий (Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta)N: а) морфология поверхности при разрешении 50 мкм; б) морфология поверхности при разрешении 5 мкм; в) области с микротрещинами при разрешении 10 мкм; г) изображение капельной фракции при разрешении 1 мкм

Рис. 4,_а показывает результаты микроанализа в 6-ти точках на поверхности покрытия. Распределение элементов высокоэнтропийного сплава: Ti, Zr, Hf, V, Nb, по глубине представлено на рис. 4,_б в виде разноцветных линий. Для микроанализа были выбраны участки в виде кратера и округлых включений капельных фракций до 8 мкм в диаметре и неповрежденные области.

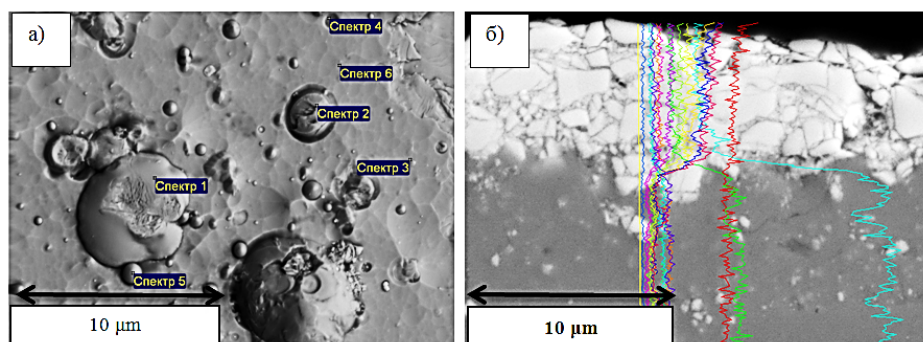


Рисунок 4 – РЭМ-изображение покрытий (Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta)N: а) морфология и точки микроанализа в разных местах на поверхности; б) толщина слоя при поперечном сечении

В табл. 2 приведены концентрации элементов Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, N в покрытии. Из табл. 2 видно, что в точке 6, то есть на неповрежденной поверхности, содержание Ti, V и Zr больше, чем в других точках. При микроанализе азот не обнаружен в точках 3, 5, 6. Азот содержится в больших количествах в капельных фракциях - до 31,4%. Поэтому нитридные соединения образуются в участках в виде капельной фазы.

Таблица 2

Элементный анализ покрытия на основе (Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta)N

Спектр	Концентрация, % (ат.)						
	Ti	Zr	Hf	V	Nb	Ta	N
Спектр 1	7,11	12,75	25,11	7,86	13,34	10,96	22,87
Спектр 2	7,24	14,14	30,11	4,99	14,92	14,21	14,39
Спектр 3	10,19	16,41	29,54	7,83	17,07	19,14	–
Спектр 4	7,81	10,79	25,33	5,95	10,74	7,98	31,4
Спектр 5	9,62	15,96	30,55	7,47	17,60	18,8	–
Спектр 6	10,31	16,60	29,37	8,39	17,46	17,87	–

Методом вакуумно-дугового осаждения получены наноструктурные покрытия системы (Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta)N. Экспериментальные исследования показывают, что покрытия, полученные при выбранных параметрах осаждения, имеют толщину 12 мкм и значение нанотвердости 28 ГПа.

Данные по расчетам свидетельствуют, что модуль упругости покрытия достигает 250 ГПа. Твердость полученных покрытий (Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta)N меняется в зависимости от условий осаждения материала и полученного, вследствие этого, структурно-фазового состава. Таким образом, для всех толщин слоев системы (Ti-Zr-Hf-V-Nb-Ta)N характерно высокотвердое состояние, что делает такие покрытия перспективными для их применения. С учетом механических свойств осажденных нанокompозитных покрытий они могут быть рекомендованы в качестве износостойких и защитных покрытий.

Список литературы

1. Zhang Y., T. Zuo, T. Tang, Z. Gao, M.C. Dahmen, K.A. Liaw // Mater. Sci. – 2014. – V. 61. – P. 1.
2. Погребняк А.Д., Багдасарян А.А., Якущенко И.В., Береснев В.М. // Успехи химии. – 2014. – № 83. – С. 11.
3. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S. // High-entropy alloys Butterworth-Heinemann. – 2014. – P. 218.
4. Pogrebnjak A.D., Beresnev V.M. // Nanomaterials Nanosystems Nanotechnology (индексируется базой данных Scopus). – 2012. – P. 147.
5. Pogrebnjak A.D. Chapter 6. Hard Nanocomposite Coatings: Their Structure and Properties / V.M. Beresnev // Nanocomposites New Trends and Developments Intech. – 2012. – P. 123-160.
6. Азаренков Н.А., Соболев О.В., Погребняк А.Д и др. // Инженерия вакуумно-плазменных покрытий. – Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина. – 2011. – С. 344.
7. Азаренков Н.А. Наноструктурные покрытия и наноматериалы / Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк и др. // Основы получения. Свойства. Области применения: Особенности современного наноструктурного направления в нанотехнологии. – М. : Изд. группа URSS. – 2012. – С. 368.
8. Gekonde H.O. Tribology of tool-chip interface and tool wear mechanisms / S.V. Subramanian // Surf. Coat. Technol. – 2002. – V. 149. – P. 151.
9. Grigore E., Ruset C., Luculescu C. The structure and properties of VN-VCN-VC coatings deposited by a high energy ion assisted magnetron sputtering method // Surf. Coat. Technol. – 2011. – V. 205. – P. 2013.
10. Pogrebnjak A.D., Yakushchenko I.V., Abadias G., Chartier G. P., Bondar O.V., Beresnev V.M., Takeda Y., Sobol' O.V., Oyoshi K., Andreyev A.A., Mukushev B.A. //

- J. Superhard Mater. – 2013. – V. 35. – P. 356.
11. Погребняк А.Д., Береснев В.М., Колесников Д.А., Каверин М.В., Шипиленко А.П., Oyoshi K., Takeda Y., Krause-Rehberg R., Пономарев А.Г. // Письма в ЖТФ. – 2013. – № 39. – С. 16.
 12. Pogrebnyak A.D., Eyidi D., Abadias G., Bondar O.V., Beresnev V.M., Sobol' O.V. // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. – 2015. – V. 48. – P. 222.
 13. Feng X., Tang G., Ma X., Sun M., Wang L. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. – 2013. – V. 301. – P. 29.
 14. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. – М.: Металлургия, 1990. – 216 с.
 15. Погребняк А.Д., Братушка С.Н., Береснев В.М., Levintant-Zayonts N. // Успехи химии. – 2013. – № 82. – С. 12.
 16. Plotnikov S.V., Erdybaeva N.K., Tleukenov E.O. Degradation of austenitic steel 12X18H10T after electron beam impact // Materials Science and Engineering. – Scopus Database. – 2015. – V. 81.
 17. Ivashchenko V.I., Pogrebnyak A.D., Skriskii P.L., Rogoz V.N., Plotnikov S.V., Erdybaeva N.K., Tleukenov E.O. The structure and properties of the nanocomposite films Nb-Al-N // Materials Science and Engineering. – Scopus Database. – 2015. – V. 81.

Получено 3.08.2016

УДК 53:621.7

Б.К. Рахадиллов, Г.К. Уазырханова, А.А. Советханова, Ж.К. Уазырханова

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск

**ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
АМЦ И АМГ6 ПОСЛЕ ВСЕСТОРОННЕЙ КОВКИ**

Алюминиевые сплавы обладают комплексом свойств, обеспечивающих им в ряде областей применения важные преимущества перед сталью и медными сплавами. Алюминиевые сплавы применяются в современной авиации, самолетостроении, судостроении, железнодорожном и автомобильном транспорте, строительстве, нефтяной и химической промышленности. К достоинствам алюминиевых сплавов следует отнести их малую плотность, сравнительно высокие прочностные характеристики, хорошую тепло- и электропроводность, технологичность, высокую коррозионную стойкость. Совокупность этих свойств позволяет отнести алюминий к числу важнейших технических материалов. Из алюминиевых сплавов можно отливать прогрессивным непрерывным методом круглые, плоские и полые слитки практически любых необходимых размеров. Сплавы сравнительно легко поддаются и горячей и холодной деформации, прокатке, ковке, прессованию, волочению, штамповке и т. д. [1-4].

Получение материалов с мелкозернистой структурой на сегодняшний день является сложной технологической проблемой. Наиболее перспективным способом изготовления полуфабрикатов с СМК- и НК-структурой является деформационно-термическая обработка, включающая интенсивную пластическую деформацию (ИПД), достигаемую обычными методами обработки металлов давлением. Существует несколько технологических модификаций метода ИПД, удобных для получения наноструктурированных материалов: деформация кручением под высоким давлением, деформация равноканальным угловым прессованием, всесторонняя ковка (ВК), сдвиг под давлением, винтовая экструзия, низкотемпературная деформация и др. [5-7].

Исследования, проводимые в последние годы, показали, что методы ИПД, такие, как равноканальное угловое прессование, ВК или кручение под высоким приложенным дав-

лением, обеспечивающие достижение высоких степеней деформации, являются эффективными для получения мелкозернистых структур. Среди перечисленных методов ИПД ВК является наиболее простым способом обработки материала, т. к. она предполагает использование универсального оборудования и инструмента, а также дает возможность практически неограниченного масштабирования обрабатываемых заготовок [8-10].

В качестве материала исследования были выбраны алюминиевые сплавы АМЦ и АМГ6. Химический состав алюминиевых сплавов: АМЦ – 96,35-99% Al; 1-1,5% Mn; 0,6% Si; 0,7% Fe; 0,05-0,2% Cu; 0,1% Zn, АМГ6-91,1-93% Al; 0,5-0,8% Mn; 0,4% Si; 0,4% Fe; 0,1% Cu; 0,2% Zn; 5,8-6,8% Mg.

Экспериментальные исследования и механические испытания проводили в лабораториях научно-исследовательского института «Нанотехнологии и новые материалы» и Региональной университетской лаборатории инженерного профиля «ИРГЕТАС» Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. Микроструктуру алюминиевых сплавов исследовали методом оптической микроскопии на НЕОРНОТ - 21.

Измерение микротвердости образцов проводили по методу Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор $P=1$ Н и времени выдержки при этой нагрузке 10 с.

Трибологические испытания проводились на воздухе по схеме «шарик – диск» (рис. 1). В качестве машины трения использовался трибометр «Tribo Micro». В качестве контртела использовался шарик диаметром 3,0 мм, изготовленный из спеченного сертифицированного материала. Нагрузка составляла 1,0 Н, скорость скольжения - 10 см/с. Испытания соответствуют международным стандартам ASTM G99-959, DIN50324 и ISO 20808.



Рисунок 1- Подготовленные образцы алюминиевых сплавов АМГ6 и АМЦ для трибологических испытаний по схеме «шарик – диск»

Заготовки образцов из алюминиевых сплавов для обработки давлением изготавливали в виде прутков диаметром 12 мм и длиной 50 мм. Их вырезали алмазным диском толщиной в 1 мм, погруженным в охлаждающую жидкость. При малых оборотах резания $n=350$ об/мин и низкой нагрузке $m=250$ г образцы из алюминиевых сплавов не испытывают деформации и термического воздействия. В процессе всестороннейковки заготовка образца продавливается в специальной оснастке (рис. 2). Для реализации всестороннейковки заготовок из сплавов АМГ6 и АМЦ использовали гидравлический пресс с возможностью усилия до 30 т (рис. 3). Прессование проводилось при комнатной температуре.

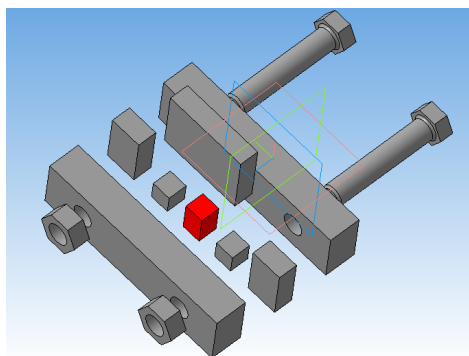


Рисунок 2 – Внешний вид оснастки для всестороннейковки



Рисунок 3 – Гидравлический пресс с оснасткой для всестороннейковки

Результаты оптической микроскопии показали, что для алюминиевых сплавов АМЦ и АМГ6 в исходном состоянии характерна преимущественно равноосная форма зерен (рис. 4). Средний размер зерен алюминиевого сплава АМГ6 в исходном состоянии составляет 18,7 мкм, для алюминиевого сплава АМЦ - 22,3 мкм.

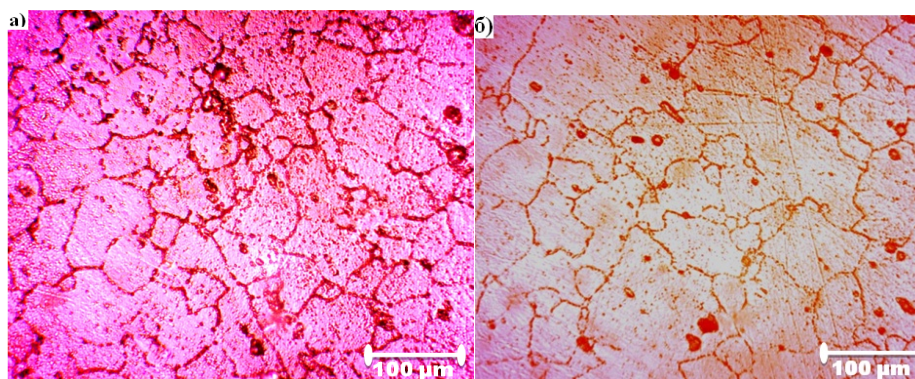


Рисунок 4 - Микроструктура алюминиевых сплавов в исходном состоянии: а - АМГ6; б - АМЦ

Всесторонняя ковка приводит к существенному изменению исходной микроструктуры, т. к. в процессе многократно повторяющихся прессований в заготовке накапливается деформация сдвигом, что в результате приводит к образованию в материале ультрамелкозернистой структуры. Средний размер зерен алюминиевых сплавов АМГ6, АМЦ значительно уменьшился (рис. 5).

Как показали экспериментальные результаты, параметры микроструктуры оказывают влияние на механические свойства. На рис. 6, 7 представлены гистограммы микротвердости по Виккерсу для алюминиевых сплавов АМЦ и АМГ6. После всестороннейковки наблюдается увеличение микротвердости в зависимости от количества проходов. Определено, что в результате всестороннейковки (15 проходов) микротвердость сплава АМГ6 возрастает до величины 1812 МПа, что почти в 5 раз выше, чем в исходном состоянии (рис. 6). В результате всестороннейковки (9 проходов) микротвердость сплава АМЦ возрастает до величины 1470 МПа, что почти в 4 раза выше, чем в исходном состоянии (рис. 7). Выявлено, что измельчение структуры при всестороннейковке сопровождается ростом микротвердости в алюминиевых сплавах АМЦ и АМГ6.

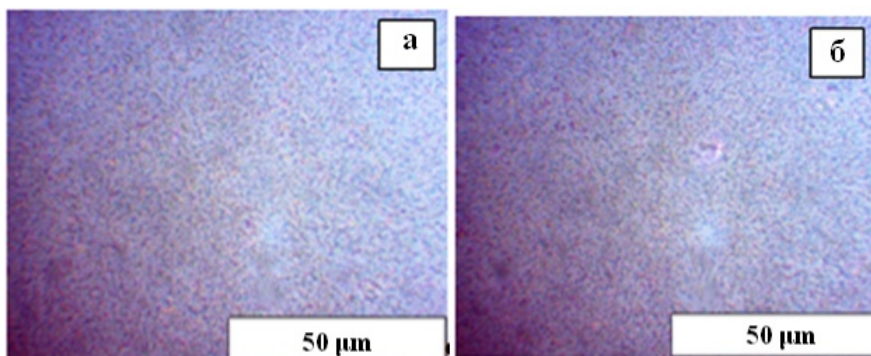


Рисунок 5 - Микроструктура алюминиевых сплавов после всестороннейковки: а - АМГ6; б - АМЦ

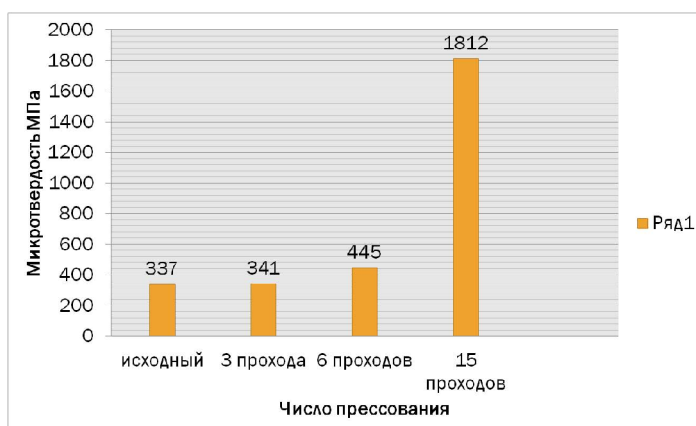


Рисунок 6 - Микротвердость сплава АМГ6 до и после всестороннейковки

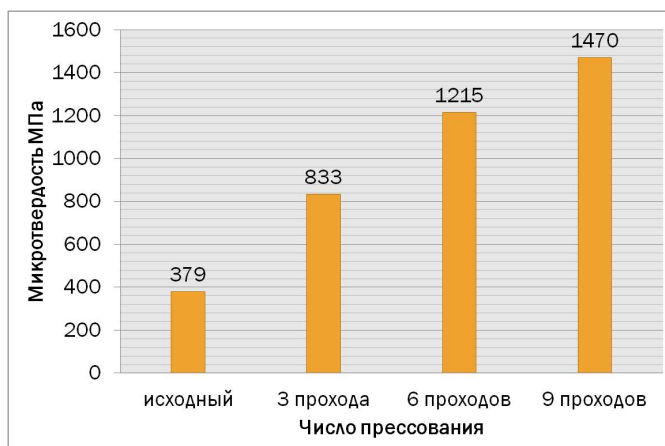


Рисунок 7 - Микротвердость сплава АМЦ до и после всестороннейковки

На рис. 8, 9 показаны изменения объема износа (мм^3) образцов алюминиевых сталей после испытания по схеме «шар - диск». Видно, что все деформированные образцы показывают значительное снижение интенсивности изнашивания по сравнению с исходным состоянием.

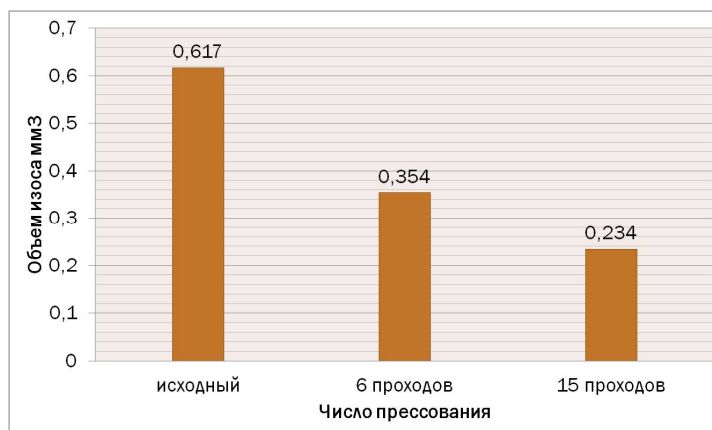


Рисунок 8 - Изменения объема износа сплава АМГ6 до и после всестороннейковки

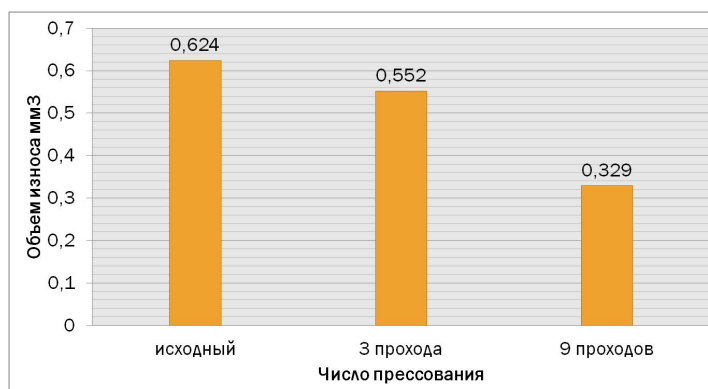


Рисунок 9 - Изменения объема износа сплава АМГ6 до и после всестороннейковки

В среднем объем изнашивания деформированных образцов алюминиевых сплавов АМГ6 и АМЦ снижается в 2 раза и, соответственно, это указывает на значительное повышение износостойкости в алюминиевых сплавах после интенсивной пластической деформации методом всестороннейковки (рис. 10, 11).

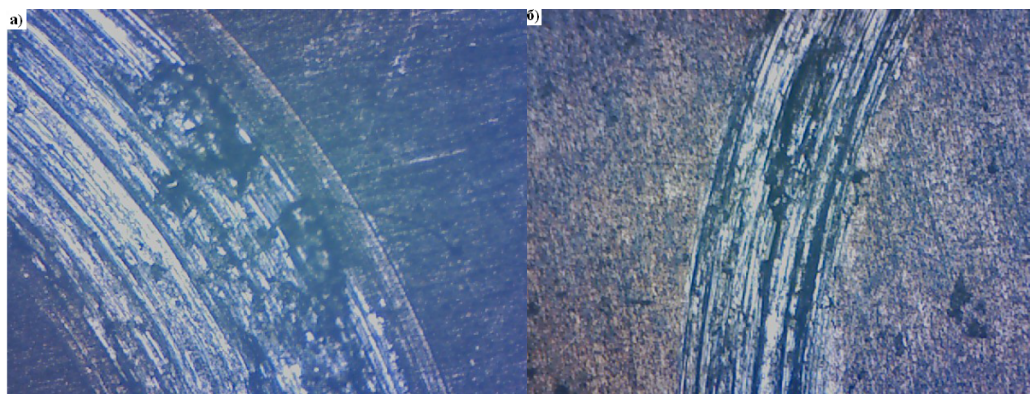


Рисунок 10 - Следы износа сплава АМГ6:
а - в исходном состоянии; б - после всестороннейковки

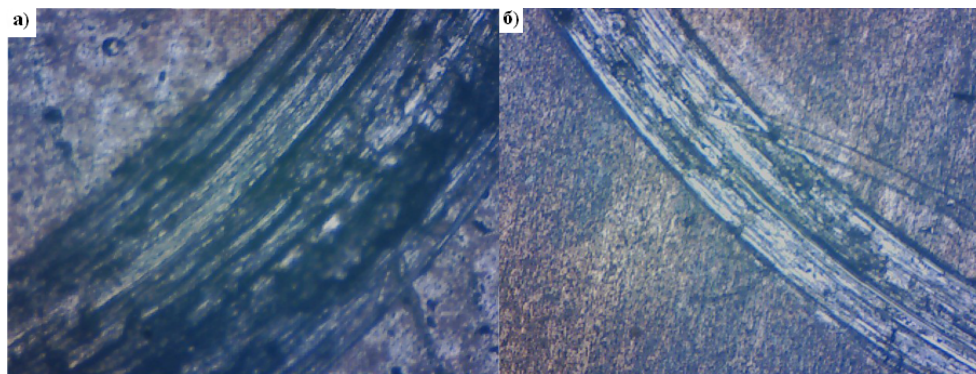


Рисунок 11 - Следы износа сплава АМЦ:
а - в исходном состоянии; б - после всестороннейковки

Таким образом, на основании полученных результатов исследования влияния всестороннейковки на микроструктуру и механические свойства алюминиевых сплавов можно сделать следующие выводы:

1. Определено, что средний размер зерен алюминиевого сплава АМГ6 в исходном состоянии составляет 18,7 мкм, для алюминиевого сплава АМЦ - 22,3 мкм. Средний размер зерен алюминиевых сплавов после всестороннейковки значительно уменьшился.

2. Установлено, что в результате всестороннейковки микротвердость алюминиевого сплава АМГ6 возрастает почти в 5 раз по сравнению с исходным состоянием. Микротвердость сплава АМЦ возрастает почти в 4 раза по сравнению с исходным состоянием. Показано, что с уменьшением размеров зерен микротвердость увеличивается.

3. Определено, что в среднем объем изнашивания деформированных образцов алюминиевых сплавов АМГ6 и АМЦ снижается в 2 раза и, соответственно, это указывает на значительное повышение износостойкости в алюминиевых сплавах после интенсивной пластической деформации методом всестороннейковки.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета Науки МОН РК по теме «Получение субмикроструктурных алюминиевых сплавов с высокими физико-механическими свойствами методом интенсивной пластической деформации» по договору № 327 от 13 мая 2016 года.

Список литературы

1. H.B. Li, X.J. Su, C.J. Li, T.S. Li, H. Xu. Influence of Different Modification on Structure and Mechanical Properties of Liquid Forging Aluminum Alloy // Advanced Materials Research -2012. -Vol. 54. P. 770-773.
2. Hugh J. McQueen, Stefano Spigarelli, Michael E. Kassner, Enrico Evangelista. Hot Deformation and Processing of Aluminum Alloys. - CRC Press, Taylor & Francis Group. - 2016. - PP 616.
3. G.W. Kuhlman. Forging of Aluminum Alloys. - Metalworking Consultant Group LLC ASM Handbook, Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming S.L. Semiatin, editor.- 2011.- P. 299-312.
4. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы перспективный материал в автомобилестроении / И.Н. Фридляндер, В.Г. Систер, О.Е. Грушко и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2002. - № 9. - С. 3-9.
5. R.M. Imaev, G.A. Salishchev, O.N. Senkov, V.M. Imaev, M.R. Shagiev, N.K. Gabbullin, A.V. Kuznetsov, F.H. Froes. Mater Sci EngA. 300, - 2001. - PP 263 .
6. A.A. Nazarov, R.R. Mulyukov. Nanostructured Materials. In: Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology, ed. by Goddard W., Brenner D., Lyshevski S., Tafra G., CRC Press Chapter 22. - 2003. - P. 121-125.
7. O. Sitdikov, T. Sakai, A. Goloborodko, H. Miura, R. Kaibyshev. Philosophical Magazine. 85. - 2005. - PP. 1159.

8. Столяров В.В. Деформационные методы измельчения структуры // Вестн. науч.-техн. развития Федер. гос. бюджетного учреждения науки, Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – 2013. – № 4 (68). – С. 29–36.
9. Ситдииков О.Ш. Влияние всестороннейковки на формирование мелкозернистой микро-структуры в высокопрочном алюминиевом сплаве // Письма о материалах. – 2013. – Т. 3. – С. 215–220.
10. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov. Progr. Mater. Sci. – 2000. – №45. – PP. 103.

Получено 13.07.2016

УДК 53.621.7

Б.К. Рахадиллов, Е. Кызырхан, Л.Г. Журерова

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВТОСЦЕПНОГО УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКОЙ

Важное значение в обеспечении безопасности движения подвижного состава железных дорог представляет надежная работа автосцепного устройства. Сложное конструктивное исполнение деталей автосцепки и их геометрических форм предъявляет повышенные требования к технологии изготовления, ремонта, системы контроля и испытаний [1].

Анализ отцепок вагонов при текущем ремонте показывает, что свыше 40% их приходится на неисправность ходовых частей и автосцепного оборудования. В эксплуатации автосцепные устройства испытывают значительные динамические нагрузки, действующие в различных плоскостях, большие перепады температур. Кроме того, на их работу отрицательно влияет незащищенность сопряженных деталей от попадания в зоны трения абразивных частиц.

В связи с растущей интенсификацией работы железнодорожного транспорта увеличиваются и требования к конструкции его подвижного состава, в частности к автосцепному устройству. Для обеспечения в этих условиях надежности эксплуатации автосцепок необходимо особое внимание уделять технологическим решениям по восстановлению их работоспособности и защите рабочих поверхностей от износа [2, 3].

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является исследование влияния электролитно-плазменной поверхностной закалки (ЭППЗ) на трибологические свойства поверхности автосцепки из стали 20ГТЛ.

Заготовки для исследований образцов стали 20ГТЛ вырезали из автосцепного устройства в виде параллелепипедов размерами 10×20×20 мм³. Перед ЭППЗ заготовки шлифовали и полировали. Модификацию поверхности стали изучали на оптическом микроскопе «ALTA-MET-1M» НИИ «Нанотехнология и новые материалы». Микротвердость поверхностных слоев образцов до и после обработки измеряли методом вдавливания алмазного индентора на приборе ПМТ-3М при нагрузке 100 г и времени выдержки при этой нагрузке 10 с в соответствии с ГОСТ 9450–76 [4].

Электролитно-плазменную обработку осуществляли в катодном режиме в электролите из водного раствора, содержащего 20% карбоната натрия, на установке ЭПОМ. Источником питания служил мощный выпрямитель, дающий на выходе максимально 360 В/60 А в виде постоянного тока. Обработку образцов производили быстрым нагревом в течение 2–3 с с последующим охлаждением в проточном электролите (см. табл.).

Технические параметры электролитно-плазменной обработки

Состав электролита (% , массовый)	Время обработки, с	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	U, В	I, А
20% - карбонат натрия + 80% - вода	2, 3	800-850	320	40

Трибологические испытания образцов стали 20ГТЛ проводили в условиях сухого трения скольжения на машине трения «Micron-tribo» в НИИ «Нанотехнология и новые материалы» ВКГУ. Машина трения «Micron-tribo» (рис. 1) предназначена для проведения испытаний на трение и износ по схеме «шар-диск». На рис. 1 представлена схема испытаний на машине трения «Micron-tribo», где N – нагрузка на шар диаметром d , а D – диаметр дорожки трения при количестве оборотов W , полученной в результате вращения образца. Принцип измерения силы трения основан на регистрации малых перемещений упругой балки с помощью дифференциального индуктивного датчика. Испытания образцов на трибометре проводились со следующими параметрами: $d = 3$ мм, $D = 8$ мм, $N = 1471$ мН, $W = 700$.

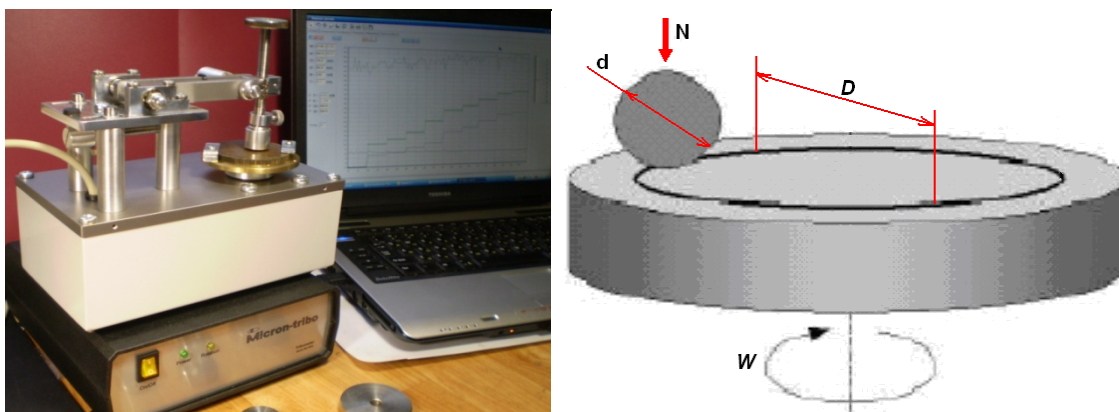


Рисунок 1 - Машина трения «Micron-tribo» и схема проведения испытания

Для определения объема вытесненного материала использовался профилометр «Micron-beta» (НИИ «Нанотехнология и новые материалы» ВКГУ). «Micron-beta» позволяет регистрировать топографию поверхности путем обработки последовательности интерференционных данных полученных картин, регистрируемых цифровой камерой при смещении опорного (эталонного) зеркала. Измерение объема дорожки вычисляется с помощью специального программного обеспечения.

При исследовании микроструктуры приповерхностных слоев образцов стали 20ГТЛ, подвергнутых ЭППЗ в электролитной плазме, обнаружены структурные изменения. На рис. 2 показана микроструктура поверхностного слоя стали до и после обработки. Микроструктура стали 20ГТЛ в исходном состоянии является ферритно-перлитной [5], в виде перлитной сетки (рис. 2,а).

После поверхностной закалки продолжительностью 2 с (рис. 2,б) наблюдается рост ферритной структуры, при этом уменьшаются зерна перлита. После ЭППЗ с нагревом в течение 3 с наблюдается образование мартенсита в структуре стали 20ГТЛ. А также можно заметить, что зерна кристалла постепенно уменьшаются по сравнению с исходным и обработанным в течение 2 с. Таким образом, микроструктура поверхности закаленного образца стали представляет собой мелкозернистую структуру.

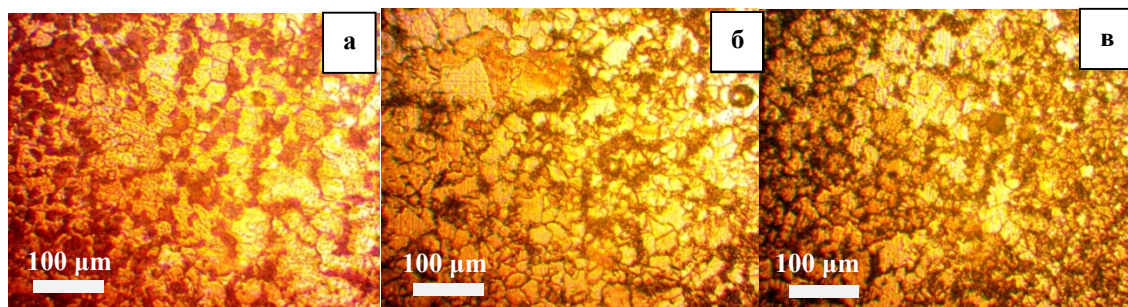


Рисунок 2 - Микроструктура поверхности стали 20ГТЛ:
а – исходный; б - после ЭППЗ 2 с; в – 3 с

Учитывая, что одним из наиболее важных свойств поверхностного слоя, который в значительной степени влияет на износостойкость, является твердость, в данной работе изучены изменения микротвердости поверхностного слоя стали 20ГТЛ после ЭППЗ. На рис. 3 приведены зависимости микротвердости стали 20ГТЛ от продолжительности воздействия электролитной плазмы. Микротвердость стали 20ГТЛ в исходном состоянии составляет 1442 МПа, а после закалки продолжительностью 2 и 3 с - 2189 и 2874 МПа соответственно.

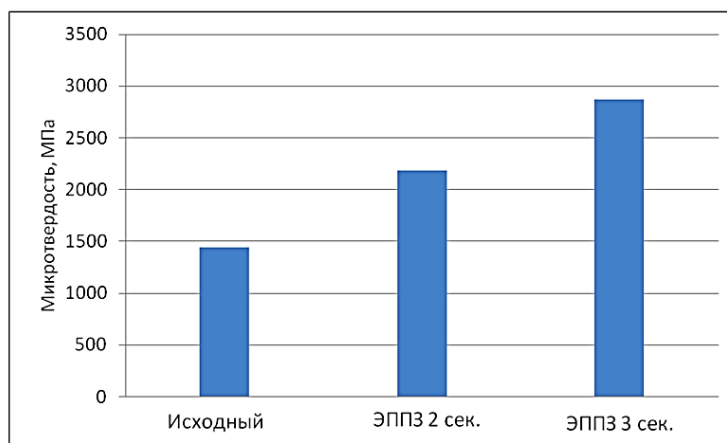


Рисунок 3 - Зависимость микротвердости стали 20ГТЛ
от продолжительности воздействия электролитной плазмы

Определение объема износа образцов проводилось при одинаковых заданных параметрах трибометра. Программное обеспечение профилометра позволяет определить объем в любом указанном участке дорожки [6-7].

На рис. 4 показаны график зависимости объема износа образцов стали 20ГТЛ от времени обработки и 2D-изображение поверхности каждого образца после сканирования интерферирующими волнами. На основании данных графика можно сделать вывод: чем больше время выдержки, тем меньше объем износа. На рисунке рядом с графиком желтым цветом изображены дорожки трения, а синим - обозначена поверхность образца. Концентрация желтых точек постепенно уменьшается. Это обусловлено уменьшением равномерности шероховатости дорожек.

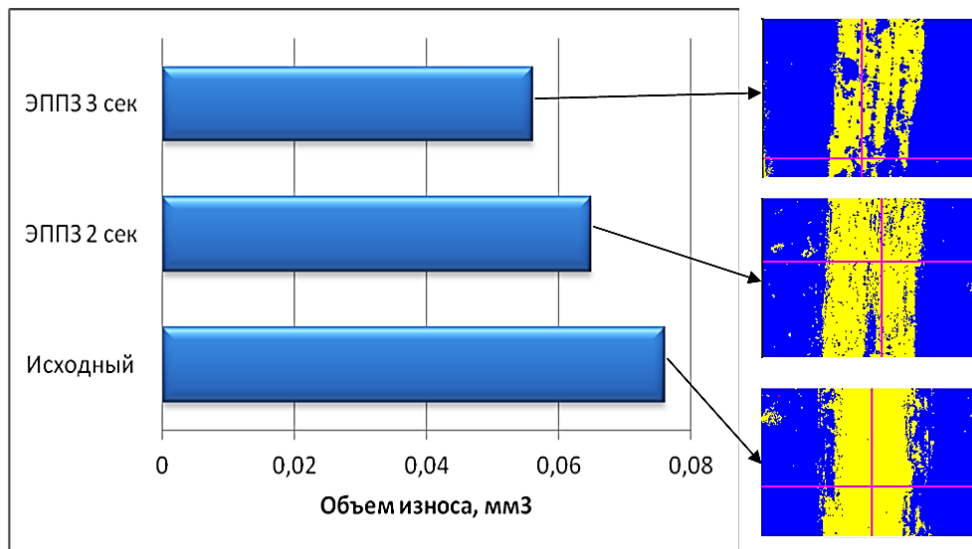


Рисунок 4 – Зависимость объем износа от времени выдержки ЭППЗ:
а - до обработки; б - после ЭППЗ - 2 с; в - ЭППЗ - 3 с

Результаты показали, что в исходном состоянии объем дорожки равен $0,076 \text{ мм}^3$. После ЭППЗ продолжительностью 2 и 3 с износ составил $0,065$ и $0,056 \text{ мм}^3$, соответственно. Уменьшение объема дорожки объясняется повышением износостойкости и твердости поверхности образца.

Износостойкость обработанного образца увеличилась по сравнению с исходным (рис. 5). Самое меньшее значение ширины зоны контакта было обнаружено на образце, обработанном в течение 3 с.

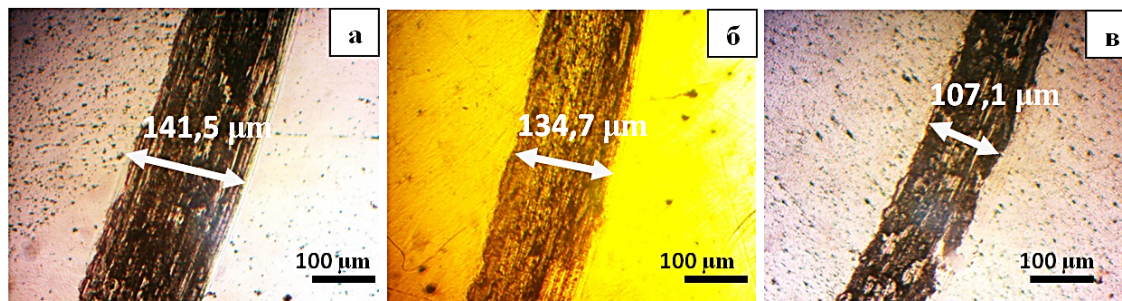


Рисунок 5 – Фотоснимки полосы износа с замерахми ее ширины:
а - до обработки; б - после ЭППЗ 2 с; в - ЭППЗ 3 с

Анализируя полученные в работе результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Применение ЭППЗ позволяет получить мелкозернистую мартенситную структуру поверхности, которая существенно влияет на трибологические свойства.
2. Определено, что микротвердость стали 20ГТЛ после ЭППЗ продолжительностью нагрева 2 с увеличивается в 1,5 раза, а после ЭППЗ 3 с увеличивается в 2 раза, в зависимости от исходного состояния.
3. Определено, что после ЭППЗ объем износа образца стали снижается с $0,076$ до $0,065$ и $0,056 \text{ мм}^3$. При этом выявлено, что максимальная ширина трека после закалки

уменьшается с 141,5 до 134,7 и 107,1 мкм при одинаковых условиях испытаний, что указывает на значительное повышение износостойкости и твердости поверхностного слоя стали 20ГТЛ.

4. Экспериментально установлено, что применение ЭППЗ является перспективным методом повышения износостойкости поверхности автосцепного устройства.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК на 2015-2017 гг. по программе «Грантовое финансирование научных исследований».

Список литературы

1. Ягодинский Е.С. Характер повреждений деталей автосцепного устройства и способы их восстановления // Сб. науч. работ УкрДАЭТ. – 2014. – С. 171-174.
2. Шадур Л.А. Вагоны / Л.А. Шадур, И.И. Челноков, Л.Н. Никольский и др. – М.: Транспорт, 1980. – 439 с.
3. Саврухин А.В. Совершенствование конструкций массивных несущих деталей подвижного состава на основе анализа напряженно-деформированного состояния при эксплуатационных и технологических воздействиях: Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.07. – М.: МГУПС, 2005. – 48 с.
4. Григоревич В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
5. Skakov M., Zhurerova L., Scheffler M. Way of Hardening Surface Coating of Details from Steel 30CrMnSi in Electrolytic Plasma // Key Engineering Materials. – 2013. – Vol.531-532. – PP. 178-181.
6. Фомихина И.В. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхности / И.В. Фомихина, Ю.О. Лисовская, Ю.Г. Алексеев и др. // Сб. докл. Междунар. симпози. «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка». – Минск, 2009. – С. 158-165.
7. Нисс В.С. Устройство осаждения и очистки парожидкостных аэрозолей для ресурсосберегающей и экологически безопасной электролитно-плазменной обработки. Ресурс- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии / В.С. Нисс, А.А. Кособуцкий, Ю.Г. Алексеев и др. // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: ВГТУ, 2010. – Ч. 2. – С. 218 – 221.

Получено 13.07.2016

ӘОЖ 621.7.011

К.Т. Шеров, А.К. Шеров, М.М. Мусаев

Қарағанды мемлекеттік техникалық университеті, Қарағанды қ.

Т.Б. Курманғалиев

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университеті,

Өскемен қ.

ҚИЫН ӨНДЕЛЕТІН МАТЕРИАЛДАРДЫ ФРЕЗЕРЛЕУ-ЖОНУ ӘДІСІМЕН ӨНДЕУ

Қазіргі заманғы техниканың дамуына байланысты жоғары төзімділікке ие, қызуға берік, коррозияға төзімді және тағы басқа арнайы қасиеттерге ие конструкциялық материалдарды пайдалану болжанады. Бұлардың ішінде көзге түсетіні құрамында маңызды физикалық-механикалық және химиялық қасиеттерді үйлестіретін темір, никель, алюминий және т. б. металдардың қорытпаларынан тиімді ерекшеленетін титан негізіндегі қорытпалар. Темір және алюминий негізіндегі конструкциялық болаттарды титанды қорытпаға алмастыру бұйымның беріктігін жоғалтпай, массасын 2 есе азайтады. Бұл әдіс машина, авиация, ракета, кеме жасауда және энергетикалық машина жасауда ерекше маңызға ие, себебі мұнда машинаның экономикалық тиімділігі бұйымның массасына байланысты. Титанды қорытпалардың өте сирек қасиеттеріне қарамастан, олардың өнеркәсіпте кеңінен пайдаланылуы кесумен өңдеу барысындағы проблемаларға байланысты: кесу жылдамдықтарының

төмендігіне байланысты (30-40 м/мин) ирмелі жоңқаның түзілуі, кескіш құралда шордың пайда болуы; кескіш құралдың беріктігінің 10 есе немесе одан да көп төмен болуына байланысты аз өнімділік; кесу барысындағы жоғары температура (800-1000 °С және жоғары) титанның жоғары химиялық белсенділігін тудырады (500 °С-тан жоғары болғанда), ол қабыршақтың пайда болуына, морттануға және өңделіп жатқан беттің шөгуіне, күйіктердің және микрожарықтардың түзілуіне, жоңқаның өздігінен тұтануына және 1 м³ ауадағы концентрациясы 50 г-нан жоғары және 33 °С-тан жоғары қыздыру кезінде титанның жарылу қаупіне әкеп соғады; ирмелі жоңқаның пайда болуы жоңқа сындыратын құрылғыларды пайдалануға мәжбүр етеді, ол құралдың конструкциясын және кескіш пластиналардың геометриясын күрделендіреді; майлау-суыту сұйығын көп мөлшерде пайдалануға байланысты тоқтап тұр.

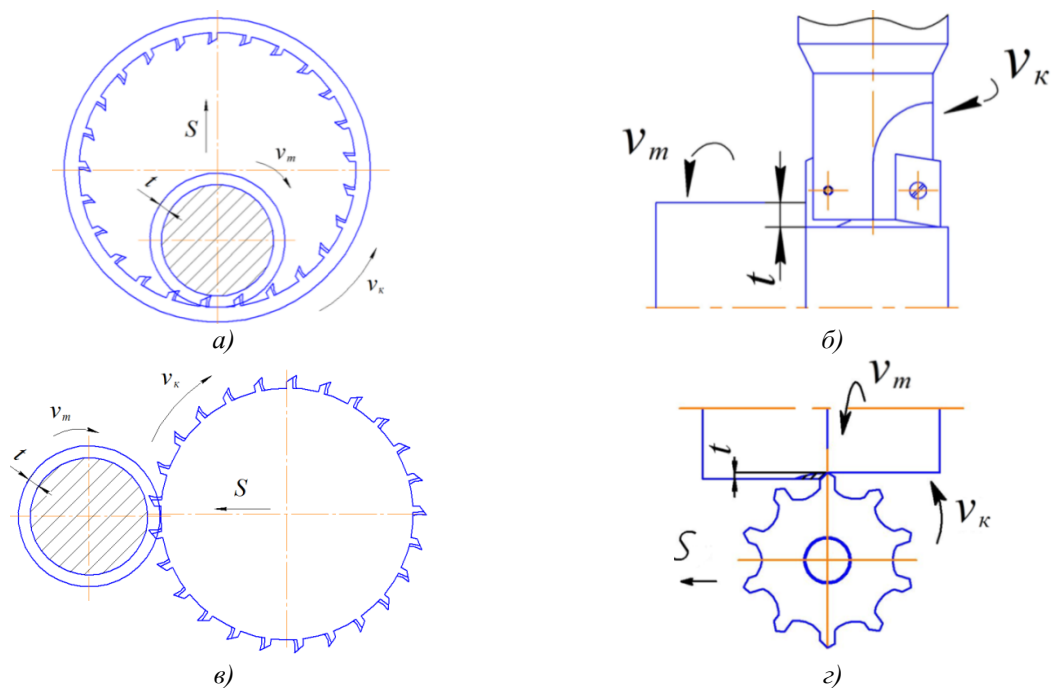
Жоғарыда айтылған проблемалармен күресу тәсілдерінің негізгісі - кесу режимдерін төмендету және майлау-суыту сұйығын көп мөлшерде пайдалану. Нәтижесінде оның өнімділігі жоғарылайды. Металдарды кесумен өңдеуді зерттеу және озық тәсілдерді енгізу, соның ішінде титан қорытпаларын пайдалану машинажасау өнеркәсібінің негізгі мақсаты болып табылады. Машинажасау кәсіпорындарының шығаратын өнімдерінің 50 % айналушы денелер немесе соның конструктивті элементтері бар тетіктері болып келеді. Мұндай тетіктерді жону тәсілімен өңдейді. Бұл әдістің артықшылықтары: практикада оңай жүзеге асатын қарапайым кинематикалық сұлбасы; жабдықтың және құралдың жеңіл әрі тез жөнделуі; өңделетін беттің жоғары сапасы мен дәлдігі.

Кемшіліктері: жоңқаның пайда болуы құралдың беріктігін, өңделетін беттің сапасы мен дәлдігін төмендетеді, процесті автоматтандыруды қиындатады; температураның жоғары болуы өңдеу процесін нашарлатады; өңдеу барысында үлкен кесу күштері пайда болады; үлкен қуатты білдектерді пайдалану қажеттілігі.

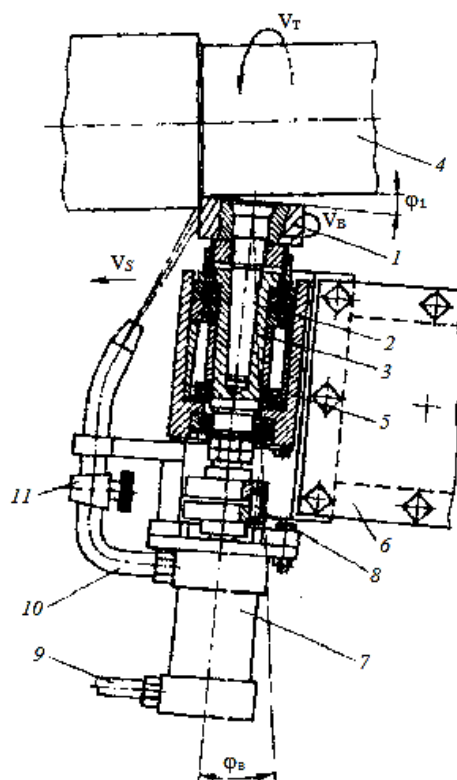
Жоғарыдағы кемшіліктерді жою мақсатында көптісті кесу құралымен (фреза) өңдеудің жаңа сұлбалары пайда болды. Фрезерлеуші құралды қолдану арқылы айналушы денелерді жону технологиясын ғылыми зерттеу жұмыстарымен Г. Шпура, Т. Штеферле, В.А. Полетаев, В.Н. Воронов, В.С. Иванов, А.Н. Селиванов және т.б. ғалымдар айналысқан. Олар өз жұмыстарында негізгі кинематикалық өңдеу сұлбасын, кесуші құралдың беріктігін, жоңқаның түзілуін, өңдеу процесінің динамикалық моделін қарастырған. Барлық зерттеу жұмыстарын жүргізуде қатты қорытпа мен тезкесуші болаттан жасалған стандарт кесуші құралдар (фрезалар) қолданылған. Зерттеулер әдетте конструкциялық болаттарды өңдеу арқылы жүргізілген. Тек А.Н. Селиванов ғана өз ғылыми-зерттеу жұмыстарын фрезерлеу-жону құрамалы әдісімен титан қорытпасын өңдеу бойынша орындаған. Оның зерттеу жұмыстарының негізгі мақсаты айналушы денелер типтес бөлшектерді фрезерлеп жону әдісімен өңдеудің өнімділігін және сапасын жоғарылату болды [1].

А.Н. Селиванов сандық модельдеу арқылы фрезерлеу-жону құрамалы әдісінің ең оңтайлы өңдеу сұлбалары ретінде 1-суретте берілген сұлбаларды көрсетті [2].

Қарпып фрезерлеу әдісімен білікті өңдеу арнайыландырылған құрал-жабдықтарды қажет етеді. Шеңберлі фрезерлеу сұлбасы үлкен габаритті білікті өңдеу кезінде қолданылады. Өңделетін дайындама диаметрі үлкейген сайын, үлкен диаметрлі фреза қолдану қажет болады. Бұл шеңберлі фрезерлеу операциясының өзіндік құнының артуына алып келеді. Мұндай кезде фрезерлеп жону және айналушы кескішпен кесу сұлбаларын қолдану ұсынылады. Соның ішінде фрезерлеп жону үлкен өнімділік пен озық өңдеу сұлбасы екені анықталған [2]. Фрезерлеп жонуды әмбебап және бағдарламалық басқарылатын токарлы білдектерде орындау үшін өзі айналатын бүйір жонғыштарды қолдану тиімді [3,4]. 2 – суретте фрезерлеп жону процесі көрсетілген [4].



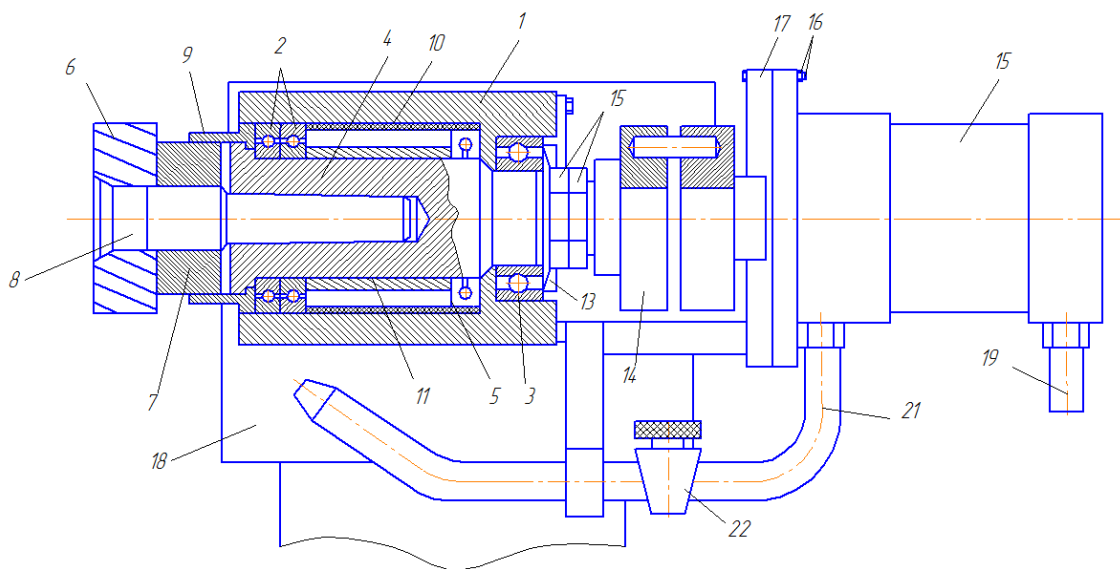
1-сурет - Фрезерлеу-жону құрамалы әдісінің ең оңтайлы өңдеу сұлбалары: а - қарпып фрезерлеу сұлбасы; б - фрезерлеп жону сұлбасы; в - шенберлі фрезерлеу сұлбасы; г - айналушы кескішпен кесу сұлбасы



2-сурет – Фрезерлеп жону процесі

Айналдырықта 5 орналасқан жақтауға 2 бекітілген конус сағалы жонғыш 1 v_T жылдамдықта айналып тұрған дайындамадан 4 v_ϕ жылдамдықта қозғалысқа келтіріледі. Айналдырық білдектің суппортында орналасқан кескіш ұстатқышқа 6 бекітілген домалау мойынтіректерінде қорапқа 5 бекітілген. Кескіш ұстағыш ρ_ϕ бұрышына бұрылады және v_S берілісімен бойлай жылжиды. Жонғыштың айналу жылдамдығы айналдырық 3 тірегінің кедергісіне және кесу күшіне тәуелді. Айналатын жонғыштың кедергісін арттыра отырып, кесу жылдамдығын да жоғарылатуға болады. Кесу энергиясын тиімді жұмысқа жұмсаған жөн, мысалы МСС беру үшін. Осы мақсатта құрылғыда сорғы 7, муфта 8 айналдырығымен қосылған ротор орнатылған (2-сурет).

Сондай-ақ бұл өнертабыстың [3] мақсаты - өздігінен айналатын жонғышпен өңдеу кезінде өнімділікті арттыру және электр энергиясына кететін шығынды азайту. Қойылған мақсатқа жоғары қысымды сорғымен жабдықталған роторы айналдырыққа жалғанған арнайы айлабұйым арқылы қол жеткізіледі (3-сурет). Мойынтіректердегі саңылауларды жою және дірілді болдырмау үшін олардың сыртқы сақиналары серіппелердің астында орналастырылған. 3-суретте жоғары қысымды сорғымен жабдықталған арнайы айлабұйым көрсетілген [3].

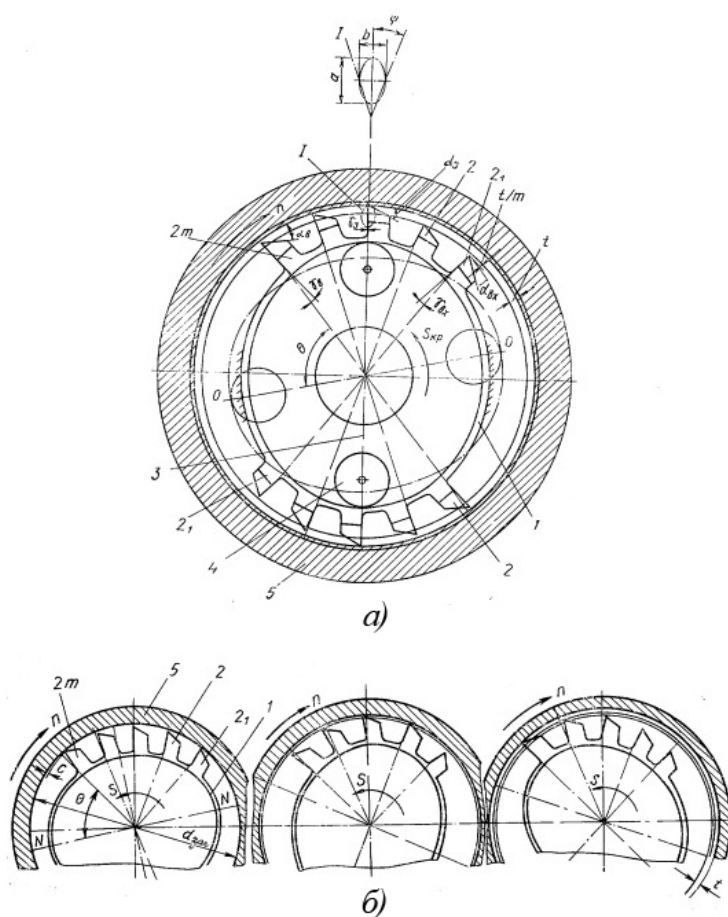


3-сурет - Жоғары қысымды сорғымен жабдықталған арнайы айлабұйым

Айлабұйым радиал-тіреуіш мойынтіректерінде 2 және 3 айналдырық 4 орналастырылған призмалық ұстағышы қораптан 1 тұрады. Тіреуіш мойынтірек 5 әбзелдің 8 конустық белдігінде сомынмен 7 тартылған ұсақ еңіс тістері бар жонғышпен 6 берілетін осьтік жүктемені қабылдайды. Мойынтіректердегі 2 саңылауларды дірілдерді жою мақсатында серпімді материалдан жасалған төлкенің 10 көмегімен таңдайды. Сонымен бірге мойынтіректердің сыртқы сақиналарының 2 жылжу күші төлкенің 10 және қашық төлкенің 11 ұзындығымен реттеледі. Айналдырықтың 4 мойынтіректік торапқа бекітілуі және осьтік саңылауларды таңдау сомын және бақылау сомынымен 12 жүзеге асырылады. Мойынтіректер алдыңғы жағынан ілме сомынмен 9, артынан қақпақпен 13 жабылады. Айналдырықтың айналымы қозғалысы жалғастырғыш 14 арқылы білдектің 18 кескіш ұстағышына, айналдырықтық тораппен бірге пісірілген кронштейнге 17,

бұрамалар және сомындармен бекітілген сорғы роторына 15 беріледі. Майлау-салқындату сұйықтығы сорып алатын түтікше 19 бойымен сорғыға 15 түседі, ол жерде кесу аймағына айдаушы түтікшелермен 21 берілетін жоғары қысымды ағынға 20 айналады. Жонғыштың өзіндік айналу жылдамдығы кранмен 22 реттеледі.

Айлабұйымның жұмысы өңделетін тетікке қатысты қажетті орында жонғышты 6 бекітуді және орнатуды, сонымен қатар тетікпен салыстырғанда сызықтық жылдамдығы 2-8 есеге аз айналатын тетікпен түйісу кезінде өздігінен айналуын қамтамасыз ету болып табылады. Ұсынылып отырған айлабұйым жону білдектерінде біржүзді кескіштерді өнімділігі мен шыдамдылығы айтарлықтай жоғары, сондай-ақ құралдың тозуға төзімділігін біршама арттыратын электр қуатының шығынысыз жоғарықысымды салқындату қамтамасыз етілетін жонғыштарға айырбастауға мүмкіндік береді. Айналушы дене тәрізді тетіктерді өңдеудің тағы бір кешенді әдісі толқынды өңдеу болып табылады [5]. Толқынды өңдеу дайындаманың айналуы мен құралдың толқынды қозғалысымен сипатталады және қозғалыс жылдамдықтарының өзара қатынасына байланысты жону, фрезерлеп жону және фрезерлеуге сәйкес келеді. Бұл тәсілдің мәні келесіде: құрал-саймандық бабканың корпусына қозғалыссыз бекітілген жоғары сапалы болаттан жасалған иілгіш сақинада 1 кескіштер 2 орнатылған (4, а-сурет).



4-сурет – Көпжүзді толқынды өңдеу сұлбасы (а) және құрал қозғалысының кезеңдері (б)

Иілгіш сақина роликтері 4 бар генератормен 5 сопақ түрге деформацияланған. Құрал-сайманды дайындаманың тесігіне енгізу үшін генераторды 5 сақинаның кескіштерден бос аймағына бұру керек. Бұл жағдайда кескіштер дайындаманың ішкі бетінен сопақшаның кіші осіне қатысты орнын өзгертеді. Өңдеу дайындаманың 5 ω_r жиілікпен айналуы және генератордың 3 иілгіш сақина мен 1 кескіштерде қума толқын деформациясын тудыратын ω_r жиілікпен айналуымен орындалады (4,б-сурет). *Толқынды өңдеу кезіндегі кесу процесі иілгіш сақинаның орнына кескіш құрал-сайман, ал қатты сақинаның орнына дайындама орнатылған толқынды тісті беріліске ұқсатылады. Дайындаманың бетінде кескіш жүздердің сырғанауына байланысты кесу жылдамдығы анықталады. Жүздерінің қозғалысының күрделілігіне қарамастан, толқындық өңдеу фасонды кескішпен жонуға сәйкес келеді. Генератордың θ_r бұрылу бұрышымен анықталатын деформацияның жүгіруші толқыны кесуші жүзді тұйық қисық – эллипс бойымен орын ауыстырады (4,а – сурет).* Эллипстің үлкен жартылай осі h еркін деформацияланған жағдайда генератордың аунақшалар 4 бойынша радиусы мен иілгіш сақинаның 1 ішкі радиусының айырмасымен анықталады. Кіші жартылай осьтің ұзындығы c деформация толқындарының санына m байланысты болады. Мысалы $m = 2$ кезінде $c \approx h/2$, ал $m = 3$ кезінде $c \approx h/3$.

Толқындық өңдеудің барлық тәртіптері екі шеткі нұсқалардың арасында болады:

1) иілгіш құрал генераторы қозғалмайды ($\omega_r = 0$), дайындама ω_r бұрыштық жылдамдықпен айналады. Бұл жағдайда дайындама мен кескіштің түйісу орны тесіктің периметрі бойынша орын ауыстырады. Бұлай өңдеу бір-біріне қарама-қарсы орналасқан кескіштермен t тереңдіктегі әдіпті кеңейте жонуға сәйкес келеді және екі толқынды генератор кезінде дайындаманың жарты айналысында орындалады ($m = 2$). Жалпы көріністе m –толқындық генератор кезінде дайындама генератордың бір айналымында $1/m$ айналым жасайды;

2) генератордың ω_r және дайындаманың ω_r бұрыштық жылдамдықтары бірдей. Кесу жүрмейді, тек кескіштер мен дайындаманың түйіскен орындарында $2h$ тереңдікке дейін ойықтар қалыптасады. z -кескіштер тобымен толқындық жону (4,б-сурет) кесу жылдамдығын анықтап беретін бұрыштық жылдамдықпен ω_r және дөңгелек беріс жылдамдығын анықтап беретін генератормен 3 ω_r дайындаманың 5 айналуы кезінде жүзеге асады. Бұрыштық жылдамдықтардың қатынастары $i = \omega_r/\omega_r \geq 10$. Кескіштер оның максималды радиалды жүрісін анықтайтын үлкен өсі $2h$ бар эллипс бойынша орын ауыстырып, дайындамамен кезекпен түйісіп отырады. Бір жүрісте алынатын ең үлкен әдіп шамасы $t_{\max} = 2h - \Delta$ (Δ - кескіштерді дайындамаға енгізу үшін жіберілетін ең кіші саңылау).

Қарастырылған айналушы денелер типтес дайындамаларды фрезерлеп жону тәсілдері жону білдегіне арнайыландырылған қарапайым айлабұйымда айналатын құралдың көмегімен жүзеге асырылады. Аталған тәсілдерді өндіріске енгізу тиімділігі қарапайым модернизациялауға кететін шығынның айтарлықтай болмауында, тот баспайтын және ыстыққа берік болаттарды өңдеу кезіндегі жоңқаның қолайлы үгітілуінде, дайындамамен құрал тістерінің тиімді түйісуі нәтижесінде кесуші тістердің шыдамдылығының артуында және өнімділіктің орташа 1,5-1,8 есеге артуында болып табылады.

Металл өңдеудің әлі игерілмеген, ең мәнді қорлары кинематикалық-технологиялық белгілерінің өзгеру дәрежесіне қарай бір тәсілден келесісіне көшуді белгілейтін кесу тәсілдерінің өзара байланысынан ашылады. Бұл өзара байланыс классикалық тәсілдерді жетілдіруге және жаңа кешенді тәсілдерді жаратуға мүмкіндік береді [4].

«Технологиялық жабдықтар, машинажасау және стандартизация» кафедрасында «Қатты қорытпалы құралдық материалды құрылымдық болатқа ауыстыруға мүмкіндік беретін импульстік салқындатумен қиын өңделетін материалдарды термофрикциялық өңдеу технологиясын жасау» (договора № 723 от 12.02.2015 г. и № 336 от 13.05.2016 г.) тақырыбында гранттық жоба орындалып жатыр және осы тақырыпты орындау аясында арнайы кесуші құрал – фрикциялық жонғышты қолдану арқылы фрезерлеп жонудың қиыстырылған тәсілін эксперименттік зерттеулер бойынша жұмыстар жүргізілді. Жасалынып жатқан тәсілдің негізгі ерекшеліктерінің бірі құралдық емес болаттан жасалған арнайы фрикциялық жонғыштың қолданылуы болып табылады. Аталған тәсілді зерттеу мен жасау үшін аз жылдамдықтағы термофрикциялық өңдеудің ресурсүнемшіл тәсілдерін жарату бойынша авторлар тарапынан алынған нәтижелер негіз болды [6, 7].

Бұдан мынандай қорытынды жасауға болады:

1. Жоғарыда айтылған мәселелер өнімділікті және қиын өңделетін материалдардан жасалынатын тетіктерді өңдеу сапасын жоғарылату үшін механикалық өңдеудің үнемшіл және жоғары сапаны қамтамасыз ете алатын әдістерін жаратуды талап етеді.

2. Айналушы дене тәрізді тетіктерді фрезерлеу және фрезерлеп жону әдісімен өңдеу процестерінің өте аз зерттелгендігі, сондай-ақ бұл бағытта жасалған бар жұмыстардың көбінесе теориялық сипатқа ие екендігі мәлім болды. Ал бұл таңдалған ғылыми бағыттың өзекті екенін дәлелдейді.

Әдебиеттер

1. Селиванов А.Н. Обеспечение качества обработки валов из титановых сплавов методом высокоскоростного фрезерования и фрезоточения / А.Н. Селиванов, Т.Г. Насад // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. – 2010. – № 3 (46). – С. 55–61.
2. Селиванов А.Н. Повышение производительности и качества обработки тел вращения из титановых сплавов методом высокоскоростного фрезерования и фрезоточения: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07, 05.02.08. – Саратов, 2011. – 141 с.: ил. РГВ ОД, 61 12-5/1050.
3. А.с. № 859053 СССР, кл. В23С7/02 / Н.В. Азенко. – Оpubл. 30.08.81, Бюл. № 32.
4. Ермаков Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Б-ка технол. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
5. А.с. № 389891 СССР, кл. В23В27/00 / Ю.М. Ермаков, Ж.Ш. Патладзе. – Оpubл. 11.07.73, Бюл. № 30.
6. Инновационный пат. № 22998 РК. Способ термофрикционной обработки плоскости и конструкция диска трения / К.Т. Шеров, Д.Е. Аликулов, К.И. Имашева и др. – Оpubл. 15.10.2010, Бюл. № 10.
7. Инновационный пат. № 25649 РК. Способ термофрикционной режущо-упрочняющей обработки цилиндрических поверхностей и конструкция диска трения / К.Т. Шеров, Т.М. Бузауова, А.К. Шеров и др. – Оpubл. 16.04.2012, Бюл. № 4.

Получено 4.08.2016