

ÒÀÕÍ È × ÀÑÊÈ Á  
Í ÀÓÈÈ



УДК 625.768.5

**М.В. Дудкин, С.Н. Фадеев, С.Ю. Пичугин**

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

**МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ СО ЛЬДОМ  
НА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЯХ**

Одной из актуальных проблем в зимний период в умеренном климатическом поясе является борьба с обледенением на автодорогах и тротуарах. В настоящее время существует несколько методов борьбы с этим. Например, распределение химических реагентов [9], механическое скальвание льда и уплотненного снега, а также их удаление плужными и роторными рабочими органами.

При химическом способе на дорожное покрытие наносятся реагенты, при помощи которых происходит разрушение льда. Но в то же время, эти реагенты оказывают негативное воздействие на транспортные средства и асфальтобетонное покрытие дороги (тротуара), разъедая и разрушая целостность поверхностного слоя. Также страдает от этого и экология.

При механическом способе удаления льда наиболее часто используются скальватели [2, 3] в виде отвала, либо убирают лед вручную, с использованием лома или железной рукояти с наконечником в виде заостренной пластины, которые в процессе работы повреждают несущее покрытие дорог. При этом машины с отвалом не удаляют тонкие слои льда и легко могут повредить дорожное покрытие, являются крупногабаритными, вследствие чего не могут обеспечить необходимую качественную уборку от снежно-ледяного образования на тротуарах и в труднодоступных местах. Ручные ударные инструменты требуют непосредственной физической силы человека и являются неэффективными из-за низкой производительности. Поэтому возникает необходимость разработки таких рабочих органов для разрушения льда на дорогах и тротуарах, которые эффективно убирают лед и при этом не повреждают поверхность под ним.

Исследования физико-механических свойств льда позволяют сделать следующие выводы:

1. Лед по своим физико-механическим свойствам может быть отнесен к квазизотропным твердым телам, обладающим упругопластическими свойствами, и имеет характерные отличия от других материалов. При действии ударных нагрузок лед ведет себя как хрупкое тело. Это объясняется тем, что для льда характерны, в отличие от большинства твердых тел, неоднородность структуры, наличие трещин и пор. Поэтому классические методы расчета прочности льда не всегда соответствуют физической картине его сопротивляемости действующим нагрузкам.

2. Величины пределов прочности льда при различных деформациях неоднозначны, т.к. сопротивляемость льда действующим нагрузкам зависит от условий формирования ледяного покрова.

Многочисленными исследователями было установлено, что сила резания по свободной схеме на 45-50 % меньше силы блокированного резания и на 25-30 % - полублокиро-

ванного. Считается, что каждая блокированная сторона увеличивает суммарное сопротивление резания на 40 %. Данные показатели объясняются тем, что в боковых частях прорези удельное сопротивление значительно меньше, чем перед лобовой частью.

В конструкциях устройств механического разрушения снежно-ледяных образований предложены как простейшие механизмы, так и сложные кинематические схемы [4,5].

По способу воздействия на уплотненный снег известные конструкции можно классифицировать (рис. 1): статического действия (катки с металлическими ребрами; ножи автогрейдеров, бульдозеров, уборочных машин, роликовые диски); фрезерующие (фрезы, шнеки, оснащенные зубьями, щетки с усиленным ворсом); ударного разрушения (с рабочими органами, движущимися поступательно, и роторного типа); вибрационные (с вертикальными, горизонтальными и наклонными колебаниями рабочих инструментов); комбинированные (статического и вибрационного действия с формированием напряжений сдвига в зоне контакта созданием циркулирующей паразитной мощности или различных скоростей движения рабочих инструментов).

В зависимости от направления движения рабочих инструментов ударного и вибрационного воздействия их можно разделить на устройства с прямолинейными с пространственными траекториями [7,10,11,12].

В конструкциях устройств механического разрушения снежно-ледяных образований предложены как простейшие механизмы, так и сложные кинематические схемы.

Анализируя технические решения рабочих органов и оборудования для механического разрушения снежно-ледяных образований на покрытиях автомобильных дорог, можно утверждать, что в новых конструкциях представлены научные и конструкторские достижения в области процессов разрушения многих отраслей техники: горного дела, металлообработки, разрушении мерзлых грунтов и т.д.

На основании сравнительного анализа и синтеза существующих устройств была предложена и разработана конструкция рабочего органа вращательно-ударного действия.

Рабочий орган размещается на малогабаритном самоходном шасси, имеет устройство регулирования высоты положения рабочего органа относительно очищаемой поверхности и работает следующим образом: вращаясь и двигаясь с определенной скоростью вдоль очищаемой поверхности, ударный ротор, представляющий собой конструкцию из дисков (рис. 1), между которыми расположены молотки, взаимодействует с ледяной или уплотненной снежной поверхностью.



Рисунок 1 – Рабочий орган ударного действия

Конструкторские работы по созданию рабочих органов по разрушению снежно-ледяного образования на покрытиях дорог велись во многих университетах мира, наиболее доступны для практического использования разработки Российских ученых и инженеров. В Казахстане, в отдельные периоды времени, похожие работы велись на кафедре технологических машин ВКГТУ им. Д. Серикбаева профессорами Дудкиным М.В. [16,17], Гурьяновым Г.А., доцентом Вавиловым А.В. [18], исследователями Краснобаевым Р.В., Сергеевым А.С., Ким А.И. На основе выводов и рекомендаций, выполненных на кафедре работ была сконструирована, разработана, собрана и испытана самоходная машина для очистки дорог от снежно-ледяных образований. Этапы проектирования и моделирования машины представлены на рис. 2.



Рисунок 2 – Этапы конструирования - от модели до натурной машины

Разработка льда, находящегося на поверхности дорог, при помощи рабочего органа ударного действия имеет ряд особенностей, обусловленных физико-механическими свойствами льда и дорожной одежды, кинематическими параметрами рабочего процесса и координатами расположения рабочего органа относительно снежно-ледяного покрова в процессе его удаления.

Для определения параметров взаимодействия снежно-ледяных образований автомобильных дорог и городских территорий с рабочим органом ударного действия льдоскальзывающей машины рассмотрим общие картины динамики удаления льда с поверхности дорог и условия получения расчётных зависимостей, обеспечивающих выбор рациональных параметров, таких, как размеры рабочих органов и режимы технологии уборки ледяных образований.

Весь процесс разработки льда можно разделить на два относительно независимых процесса: взаимодействие рабочего органа со льдом и взаимодействие рабочего органа с асфальтобетонной поверхностью. Причём параметры рабочего органа и режимы его эксплуатации в обоих случаях взаимодействия будут идентичны. Целью исследований является определение таких параметров рабочего органа и его режимов работы, при которых достигается максимально эффективное удаление снежно-ледяных образований с поверхностей автомобильных дорог при обязательном соблюдении целостности дорожной одежды и тротуаров. Результаты многочисленных исследований [1,6] указывают на то, что наиболее сложным с точки зрения разрушения являются твёрдый ледяной налёт и гололёд, имеющие прочность при температуре 0 °C до 2,86 МПа и величину адгезии к асфальтобетонной поверхности до 2 МПа.

При вращении шарнирно-свободно размещенного на торцевом диске инерционного бойка вокруг оси приводного цилиндра (рис. 3), он по высоте позиционируется до касания с поверхностью несущего слоя автомобильной дороги.

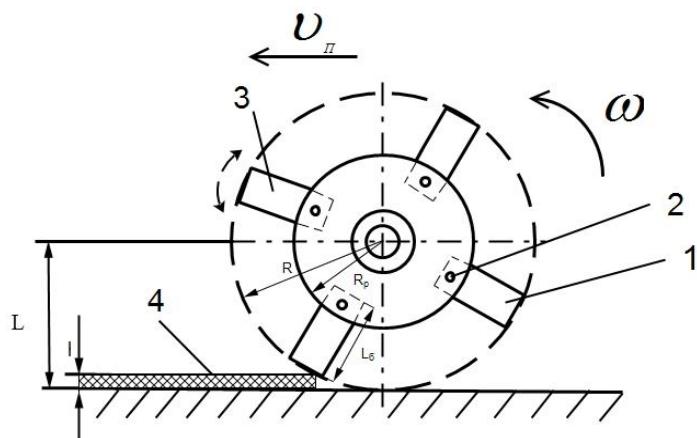


Рисунок 3 – Расчетная схема механизма рабочего органа

Ледяной слой расположен выше этой точки, поэтому боец врезается в разрабатывающую среду с некоторой силой  $F$ , равной геометрической сумме силы тяжести бойка  $G_b$  и центробежной силы  $C_b$ , возникающей при вращении бойка:

$$F = C_b + G_b. \quad (1)$$

Выражение можно записать в виде:

$$F = \sqrt{\left(\frac{m_b v_c^2}{R}\right)^2 + (m_b g)^2} \pm \frac{m_b v_c^2}{R} m_b g \cos \varphi, \quad (2)$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $m_b$  – масса бойка, кг.

При построении математической модели взаимодействия снежно-ледяных образований со специальным рабочим органом ударного действия были сделаны следующие до-

пущения:

- поверхность снежно-ледяных образований представляет собой ровную горизонтальную поверхность как со стороны контакта с асфальтобетонной поверхностью автомобильной дороги, так и со стороны свободной поверхности;
- физико-механические свойства снежно-ледяных образований считаем постоянными по всей трассе движения льдоскалывающей машины, температуру ледового образования принимаем равной температуре окружающей среды, изменение температуры по толщине льда считаем отсутствующим в связи с относительно малой толщиной льда. Свойства льда, такие, как прочность, твёрдость и другие, связанные с изменением температуры, также считаем постоянными;
- движение льдоскалывающей машины считаем прямолинейным, а вращение рабочего органа, кроме специально оговорённых случаев, равномерным.

В реальности лёд, образующийся на поверхности дорог, по своему составу и структуре неоднороден. Кроме того, на силу удара будет влиять также и форма самого бойка. Поэтому выражение для определения ударной силы бойка будет иметь вид:

$$P_{уд} = K_1 \cdot K_2 \cdot P_{max} = K_1 \cdot K_2 \cdot v_c \sqrt{2\pi L_{min} m_6 \sigma_b}. \quad (3)$$

Общая сила резания льда бойком рабочего органа ударно-вращательного действия может быть определена из следующего выражения:

$$P_{рез} = \frac{C_0}{tg\beta} P_3 h_1^{0,47} \frac{b_1}{K_{неп}} (1 + kt) (1 + \xi v_c) \left( 1 + 4h_1 \sqrt{\frac{C_0 \pi}{(1-2\mu)tg\alpha}} \right). \quad (4)$$

Скорость разработки определяется геометрической суммой окружной скорости вращения рабочего органа (по ударной кромке бойка)  $\omega R$  (причём величина  $R$  определяется с учётом изгиба каждой упругой связи) и скорости поступательного движения льдоуборочной машины  $v_n$  (скорости подачи). По правилу параллелограмма скорость разработки будет равна:

$$v_c = \sqrt{v_n^2 \pm \omega^2 \cdot R^2 \pm 2 \cdot \omega \cdot R \cdot v_n \cdot \cos\varphi}. \quad (5)$$

Одной из основных характеристик рабочего органа ударно-вращательного действия, влияющей на параметры ледового скола и на сохранность дорожного основания, является масса бойка. Данная величина определится из следующего соотношения:

$$m_6 = \frac{2\pi h_3^3 \rho_l}{3 \left( \frac{v_c}{v_n} + 1 \right)}. \quad (6)$$

Таким образом, мощность, затрачиваемая на разрушение удаляемой среды, может быть определена как произведение крутящего момента на скорость вращения рабочего органа ударного действия, а мощность на создание тягового усилия - как произведение скорости движения машины на величину этой силы:

$$N_{разр} = v_n P_t + \omega M_{кп}. \quad (7)$$

Эксперименты проводились как на натурных образцах рабочего органа, так и на их моделях (рис. 4). Экспериментальные исследования состояли из трёх этапов: исследование характеристик обледенелостей как разрабатываемой среды; проверка предложенной модели разработки льда единичным бойком; проверка математической модели всего рабочего органа в целом.

При этом измерениям подвергались высоты неровностей чистой поверхности дорог, а при наличии на ней льда и снежного наката измерения проводились с использованием стандартного нивелира, при этом учитывались величины эталонных сил удара и поправочных коэффициентов.

Анализ полученной информации и проведённые постановочные эксперименты выявили

пять факторов, формирующих силу сопротивления разработки льда. Такое количество факторов заставляет отказаться от классической схемы эксперимента, для определения численных значений, базовой математической модели взаимодействия специального рабочего органа ударного действия со льдом и уплотнённым снегом. Поэтому для решения данной задачи пришлось применить методы и приёмы теории планирования эксперимента.



Рисунок 4 – Проведение эксперимента по очистке дорог от снежно-ледяных образований

Проведена проверка достоверности экспериментальных данных, полученных при испытаниях натурных образцов специального рабочего органа ударного действия на воспроизводимость результатов по критерию Кохрена и на адекватность математической модели по критерию Фишера (рис. 5). В ходе проверки установлена достоверность результатов по обоим критериям.

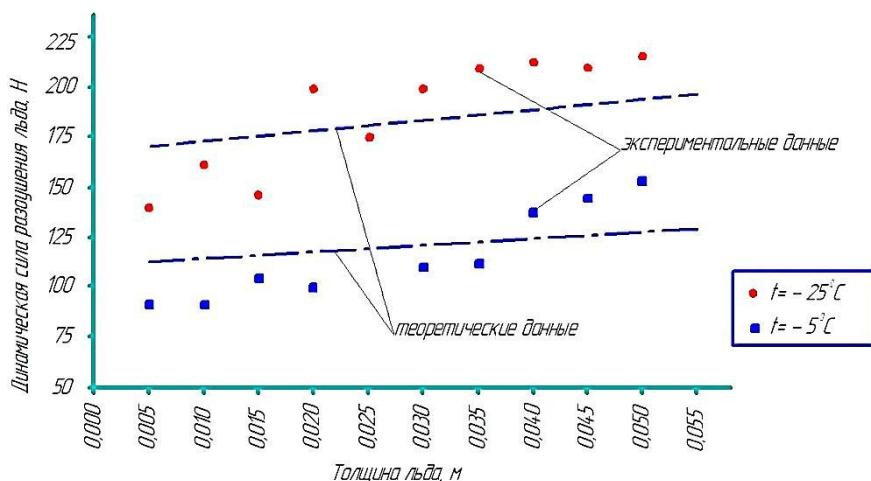


Рисунок 5 - Сравнение теоретических и экспериментальных исследований

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель взаимодействия рабочего органа ударного действия со льдом и снежно-ледяным накатом на дорожных покрытиях.
2. Проведено экспериментально-теоретическое исследование процесса разрушения льда при выбранной схеме разработки. Среднеквадратичное отклонение, в зависимости от исследуемых параметров, составило от 12 до 28 %.
3. Спроектирована и разработана конструкция машины для скальвания льда с поверхности дорог без повреждения верхнего слоя асфальтового покрытия.
4. Результаты исследования в дальнейшем будут использованы при модернизации существующих образцов льдоуборочных машин, а также при разработке перспективных проектно-конструкторских решений.

#### Список литературы

1. Андронов А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. - М.: Физматгиз, 1959. - 726 с.
2. Бабаков И.М. Теория колебаний. - 2-е изд. - М.: Наука, 1968. - 559 с.
3. Баладинский В.Л. Определение энергоемкости процесса резания грунтов повышенной крепости вибрирующим рабочим органом // Горные, строительные и дорожные машины (Межвед. Республ. научно-техн. сборник). - Изд-во «Техника». - 1965. - № 1. - С. 38-43.
4. Барон Л.И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами / Л.И. Барон, Л.Б. Глатман, Е.К. Губенков. - М.: Наука, 1968. - 216 с.
5. Бауман В.А. Вибрационные машины и процессы в строительстве / В.А. Бауман, И.И. Быховский. - М.: Высшая школа, 1977. - 255 с.
6. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний: Учеб. пособие для вузов: М.: Высшая школа, 1972. - 416 с.
7. Блохин В.С. Теория процесса разрушения горных пород при бурении скважин. - Днепропетровск: ДИСИ. - 1979. - 186 с.
8. Борьба со снегом и гололёдом на транспорте // Материалы II Междунар. симпозиума, 15-19 мая 1978 г., Ганновер, штат Нью-Гэмпшир, США / Пер. с англ. Л.Я. Менис, М.Н. Шипковой; Под ред. А.П. Васильева. - М.: Транспорт, 1986. - 216 с.
9. Бялобжеский Г.В. Борьба с зимней скользкостью на автомобильных дорогах / Г.В. Бялобжеский, М.М. Дербенева, В.И. Мазепова и др. - М.: Транспорт, - 1975. - 112 с.
10. Варсанофьев В.Д. Гидравлические вибраторы / В.Д. Варсанофьев, О.В. Кузнецов. - Л.: Машиностроение (Ленинград, отделение), 1979. - 144 с.
11. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. - М.: Машиностроение, 1971. - 360 с.
12. Вибрации в технике: Справ. В 6-ти т. / В.Н. Челомей (пред. ред. совета). - М.: Машиностроение, 1978. - Т. 1: Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. - 1978. - 352 с.
13. Вибрации в технике: Справ. В 6-ти т. / В.Н. Челомей (пред. ред. совета). - М.: Машиностроение, 1981. - Т. 4: Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавен-

- дела. - 1981. - 509 с.
14. Вибрации в технике: Справ. В 6-ти т. / В.Н. Челомей (пред. ред. совета). - М.: Машиностроение, 1981. - Т. 5: Измерения и испытания /Под ред. М.Д. Генкина. - 1981. - 496 с.
  15. Вибрации в технике: Справ. В 6-ти т. / В.Н. Челомей (пред. ред. совета). - М.: Машиностроение, 1981. - Т. 6: Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова. - 1981. - 456 с.
  16. Doudkin M.V., Pichugin S.Y., Fadeev S.N. Contact Force Calculation of the Machine Operational PointLife Science Journal 2013;10(10s):246-250. (ISSN:1097-8135). Life Science Journal Editorial Office. P.O. Box 180432, Richmond Hill, New York 11418, the United States. <http://www.lifesciencesite.com>. 39.
  17. Doudkin M.V., Pichugin S.Y., Fadeev S.N. Studying the Machines for Road MaintenanceLife Science Journal 2013; 10(12s):134-138. (ISSN:1097-8135). Life Science Journal Editorial Office. P.O. Box 180432, Richmond Hill, New York 11418, the United States.<http://www.lifesciencesite.com>. 24.
  18. Doudkin M.V., Vavilov A.V., Pichugin S.Y., Fadeev S.N. Calculation of the Interaction of Working Body of Road Machine with the SurfaceLife Science Journal 2013;10(12s):832-837. (ISSN: 1097-8135). Life Science Journal Editorial Office. P.O. Box 180432, Richmond Hill, New York 11418, the United States.<http://www.lifesciencesite.com>. 133.

Получено 14.07.2015

УДК 625.7.084.539.3.6

**М.В. Дудкин, С.Ю. Пичугин, С.Н. Фадеев**

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

#### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЯТНА КОНТАКТА ГИБКОГО ВАЛЬЦА КАТКА С УПЛОТНИЕМОЙ СРЕДОЙ

В работах [1, 2] рассмотрен общий случай плоской контактной деформации, когда касание сжимаемых тел происходит по прямой линии, перпендикулярной плоскости  $x_0y$  (рис. 1,*a*).

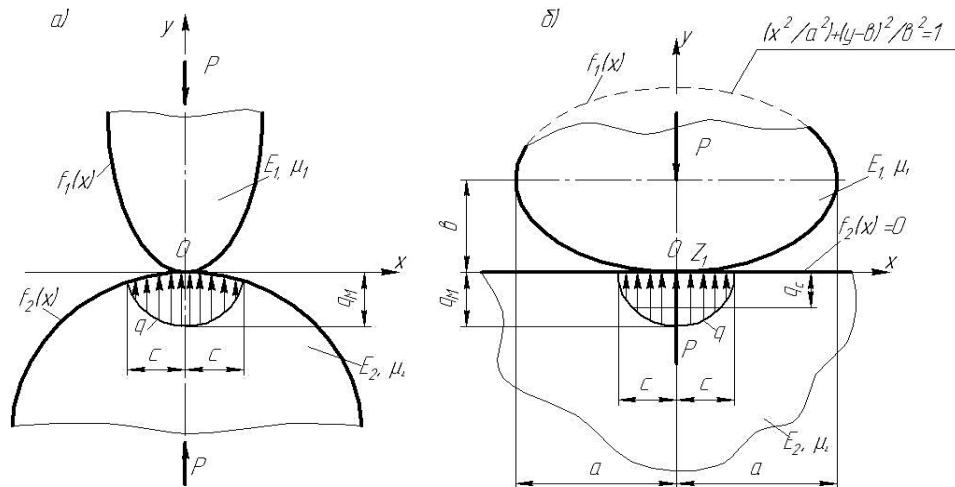


Рисунок 1 - Общий случай плоской контактной деформации

Направляя ось 0x по общей касательной к кривым  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$ , ограничивающим упругие тела, будем иметь:  $f_1B(0) = f_2B(0) = 0$ . Сумму вторых производных  $f_1BB(0) + f_2BB(0)$  считаем отличной от нуля и, вводя допущение о малости упругих перемещений, пред-

ставляем  $f_1 + f_2$  следующим образом [1, 3]:

$$f'_1(x) + f'_2(x) = [f'_1(0) + f'_2(0)] \cdot \frac{x^2}{2}. \quad (1)$$

Вводим предложение относительно распределённых контактных сил  $q=q(x)$ : их равнодействующая  $P$ , перпендикулярная оси  $0x$ , направлена к точке 0 начала касания взаимодействующих поверхностей. Так как первоначальный просвет между контактирующими телами, согласно (1), является симметричным относительно оси  $0y$ , то и давление  $q$  на цилиндрических поверхностях будет также осесимметричной эллиптической функцией по аргументу  $x$  (функция Герца-Штаермана), которая [1] имеет вид:

$$q = q(x) = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot c^2} \cdot \sqrt{c^2 - x^2} = \frac{q_m}{c} \cdot \sqrt{c^2 - x^2} = \frac{4 \cdot q_c}{\pi \cdot c} \cdot \sqrt{c^2 - x^2}, \quad (2)$$

где  $q_m$ ,  $q_c$  - соответственно максимальное и среднее значения функциональной зависимости  $q(x)$  (рис. 1,*a*);  $c = \sqrt{\frac{2 \cdot P \cdot (y_1 + y_2)}{f'_1(0) + f'_2(0)}}$  – полуширина области контакта [1] ( $-c \leq x \leq c$ );

$y_1$ ,  $y_2$  – физико-механические постоянные взаимодействующих материалов, зависящие от модулей упругости  $E_1$  и  $E_2$  и коэффициентов Пуассона  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ :  $y_1 = \frac{P}{\pi \cdot E_1} \cdot (1 - \mu_1^2)$ ,

$$y_2 = \frac{2}{\pi \cdot E_2} \cdot (1 - \mu_2^2).$$

Сила  $P$  связана с реактивным давлением  $q$  интегральным соотношением

$$P = \int_{-c}^c q(x) dx = 2 \cdot \int_0^c q(x) dx. \quad (3)$$

Модифицируем формулу И. Ф. Штаермана (2) [1] применительно к решаемой задаче, когда неподвижный стальной валец, моделируемый абсолютно жестким и гладким цилиндрическим штампом эллиптического профиля  $f_1(x)$  ( $y_1=0$ ,  $E_1>>E_2$  или  $E_1=\infty$ ), оказывает статическое давление на упругодеформируемую полуплоскость  $f_2(x) = 0 \Rightarrow f_2''(0) = 0$ , представляющую собой уплотненный до прекращения остаточных перемещений слой грунта или дорожного покрытия, имеющего среднее значение коэффициента Пуассона  $\mu_2 = 0,25$  ( $0,2\dots0,3$ ) и модуль деформации  $E_2 = E_k$  [4] (рис. 1,*б*).

Для преобразования и адаптации фундаментальных зависимостей (2) приводим необходимые аналитические соотношения (рис. 2) [3, 5]:

- функции нижней половины цилиндрической поверхности вальца  $f_1(x)$  и её второй производной  $f_1''(x)$  из уравнения эллипса (рис. 1,*б*):

$$f_1(x) = y(x) = -b \cdot \left( \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} - 1 \right), \quad 0 \leq y \leq b, \quad (4)$$

$$f_1''(x) = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{b}{a^2} \cdot \left( 1 - \frac{x^2}{a^2} \right)^{-\frac{3}{2}}, \quad -a \leq x \leq a, \quad (5)$$

значение  $f_1''(0)$  при  $x=0$ :  $f_1''(0) = b/a^2$ ;

- радиусы кривизны  $R=R(x)$  и  $R(0)$  эллиптической направляющей цилиндра (4), принимая во внимание выражения (5):

$$R = R(x) = \frac{[1 + (y')^2]^{\frac{3}{2}}}{y''} = \left[ 1 - \frac{x^2}{a^2} \cdot \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \right] \cdot \frac{a^2}{b}, \quad (6)$$

$$R(0) = \frac{1}{f_1''(0)} = \frac{a^2}{b}; \quad (7)$$

- формула, связывающая удельную линейную силу Р с шириной вальца В и вертикальной нагрузкой  $G_b$ , приложенной к его центру:  $P = G_b/B$ ;

- глубина  $h$  погружения катка в уплотняемый слой материала (высота сегмента к0к', рисунок 2), которую находим из уравнения эллипса (рисунок 1,б), когда  $x = \pm c$  и  $y = h$ :

$$\frac{c^2}{a^2} + \frac{(h-b)^2}{b^2} = 1, \text{ или, при } h-b < 0, h = b \cdot \sqrt{1 - \frac{c^2}{a^2}},$$

где  $c$  - величина полуходы кривой к0к' (рис. 2).

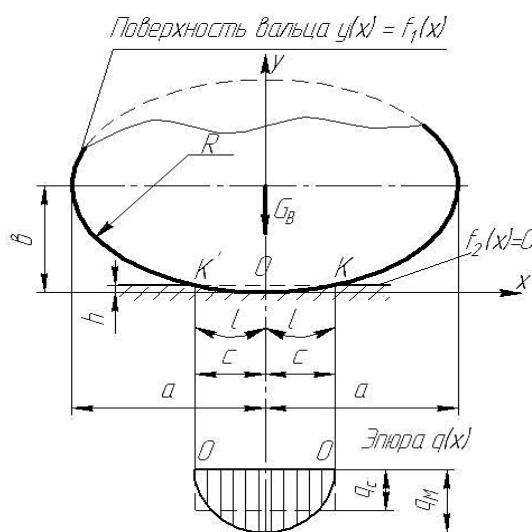


Рисунок 2 – Схема контакты вальца с уплотняемым материалом

Используя формулы (4)-(7), конкретизируем выражения (2) - (7), после вышеуказанных подстановок  $E_2 = E_k$ ,  $f_2(x) = 0$ ,  $f_2''(0) = 0$ ,  $y_1 = 0$ ,  $\mu_2 = 0,25$ :

$$q = q(x) = \frac{2 \cdot G_b}{\pi \cdot B \cdot c^2} \cdot \sqrt{c^2 - x^2} = \frac{g_M}{c} \cdot \sqrt{c^2 - x^2} = \frac{4 g_O}{\pi \cdot c} \cdot \sqrt{c^2 - x^2}, \quad (8)$$

$$q_M = \frac{2 \cdot G_b}{\pi \cdot B \cdot c}, \quad q_C = \frac{G_b}{2 \cdot B \cdot c}, \quad (9)$$

$$q_M = \frac{4}{\pi} \cdot q_C, \quad (10)$$

$$Y_2 = \frac{2}{\pi \cdot E_K} \cdot (1 - \mu_2^2) = \frac{1,875}{\pi \cdot E_K}, \quad (11)$$

$$c = \sqrt{\frac{2G_B \cdot Y_2}{B \cdot f_1''(0)}} = a \cdot \sqrt{\frac{3,75 \cdot G_B}{\pi \cdot E_K \cdot b \cdot B}}, \quad (12)$$

$$h = b \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{3,75 \cdot G_B}{\pi \cdot E_K \cdot b \cdot B}} \right). \quad (13)$$

Корректность формул (8) – (13) следует из осевой симметрии расчётных схем рисунка 1 и первоначального соприкосновения взаимодействующих тел по оси  $z \perp xoy$ , проходящей через точку  $x=y=0$  (рис. 1,б). При этом модель плоского деформированного состояния, положенная в основу зависимостей (8) – (13), является адекватной применительно к данной задаче [7] для областей контакта цилиндрической поверхности вальца с уплотняемым материалом в пределах соблюдения условия (7) и [1]  $c \ll R(0) = a^2 / \varepsilon$ , когда выполняется равенство (1), подтверждающее возможность приближённой аппроксимации функции (4), согласно (5) и [3], то есть:

$$f_1(x) = \varepsilon \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \right) \approx \varepsilon \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{2 \cdot a^2}} \right) \right] = \frac{\varepsilon}{a^2} \cdot \frac{x^2}{2}, \quad (14)$$

$$f_1(x) + f_2(x) = [f_1''(0) + f_2''(0)] \cdot \frac{x^2}{2} = \frac{\varepsilon}{a^2} \cdot \frac{x^2}{2}, \quad -c < x \leq c, \quad (15)$$

где  $f_2(x) = 0 \Rightarrow f_2''(0) = 0$  (рис. 1,б и 2).

Практическая реализация аналитических зависимостей (8) – (13) требует введения дополнительной предпосылки о неизменной длине  $S$  эллиптической образующей цилиндра в процессе её трансформации в окружность радиусом  $R=\text{const}$ . В этой связи и с целью со-поставимости последующих расчётных величин при различных полуосиях  $a, b$  эллипса, приводим методику вычисления  $S$  и линейного размера  $2l$  дуги контакта  $k0k'$  (рис. 2).

Для математической формулировки данной процедуры удобнее записать каноническое уравнение того же эллипса (рис. 1,б и 2)

$$\frac{x_3^2}{a^2} + \frac{y_3^2}{b^2} = 1, \quad (16)$$

где [3, 5]:  $x_3 = a \cdot \sin \varphi, \quad y_3 = b \cdot \cos \varphi$ .

Геометрический смысл параметра  $\varphi$  понятен из рис. 3, где  $AN A'$  - полуокружность радиуса  $a$  с точкой  $N$ , взятой на одной вертикали с точкой  $M$  эллипса, по ту же сторону от оси  $AA'$ . Непосредственно в решаемой задаче угол  $\varphi$  имеет два численных значения:

1) для расчета одной четвёртой части параметра  $S$ , когда  $x_3 = a$

$$\varphi = \varphi_S = \frac{\pi}{2} = 90^\circ; \quad (17)$$

2) к определению длины эллиптической полудуги  $l$  при  $x_3 = c$  (формулы (12), (16) и рис. 3)

$$\varphi = \varphi_l = \arcsin \frac{c}{a} = \arcsin \sqrt{\frac{3,75 \cdot G_B}{\pi \cdot E_K \cdot b \cdot B}}. \quad (18)$$

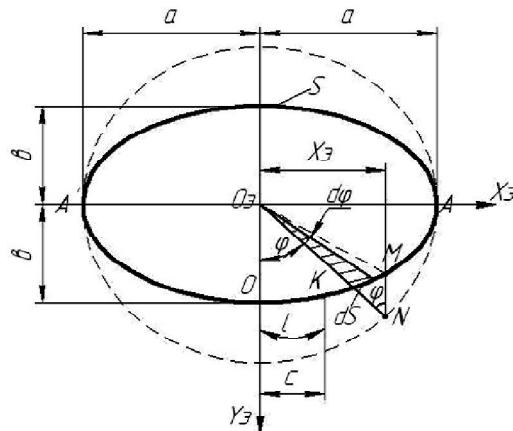


Рисунок 3 - К определению длины эллиптической полуудуги

Дифференциал  $dS$  дуги  $S$  (рис. 3) имеет вид:  $dS = a \cdot \sqrt{1 - \xi^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$ ,  
где  $\xi = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$  - эксцентриситет эллипса,  $a \geq b$ ,  $(0 \leq \xi \leq 1)$ , [3, 5].

Для окружности ( $a=b$ ), являющейся частным видом эллипса,  $\xi=0$ . Представляем искомые размеры  $l$  и  $S$  эллиптическими интегралами  $E(\varphi_i, \xi)$ ,  $E\left(\frac{\pi}{2}, \xi\right) = E(\xi)$  второго рода в форме Лежандра [5, 6], для вычисления которых составлены справочные таблицы [3, 8].

$$l = a \cdot \int_0^{\varphi_i} \sqrt{1 - \xi^2 \cdot \sin^2 \varphi} d\varphi = a \cdot E(\varphi_i, \xi), \quad (19)$$

$$S = 4 \cdot a \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \xi^2 \cdot \sin^2 \varphi} d\varphi = 4 \cdot a \cdot E(\xi). \quad (20)$$

Разработанная контактная задача доказывает возможность регулирования параметров контактного пятна взаимодействия катка с уплотняемой средой путём варьирования в эксплуатационных условиях проектно-конструктивных размеров полусей эллипсообразной поверхности гибкой обечайки вальца дорожного катка, что позволяет регулировать силовое воздействие катка на уплотняемую поверхность.

#### Список литературы

1. Штаерман И.Ф. Контактная задача теории упругости. - М.;Л.: Гостехиздат, 1949. - 270 с.
2. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкости. - М.: Наука, 1980. - 340 с.
3. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семеняев. - М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. - 608 с.
4. Калужский Я.А. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд / Я.А. Калужский, О.Т. Батраков. - М.: Транспорт, 1970. - 160 с.
5. Выгодский М.Л. Справочник по высшей математике. - М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. - 872 с.
6. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. - М.: Наука, 1966. - Т. 2. - 800 с.
7. Биргер И.А. Расчёт на прочность деталей машин: Справ. / И.А. Биргер, Е.Ф. Шорр, Г.Б. Носилевич. - М.: Машиностроение, 1979. - 701 с.

8. Попов Е.П. Теория и расчёт гибких упругих стержней. – М: Наука, 1986. – 296 с.

Получено 14.07.2015

УДК 536

**Г.У. Ерболатова**

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

**М.К. Скаков**

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, г. Курчатов

**Н.А. Попова**

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА СПЛАВА 40ХНЮ  
ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

В настоящее время в машиностроении большое внимание уделяется развитию технологий поверхностного упрочнения, которые основаны на модифицирующем воздействии на поверхность металла энергетическими или физико-химическими методами, что радикально меняет ее структуру и свойства [1].

Одним из вариантов плазменной химико-термической обработки металлов и сплавов является катодное диффузионное насыщение, осуществляющееся в водных электролитах. Изменяя состав электролита, можно проводить цементацию, азотирование, нитроцементацию, борирование, карбидизацию и другие виды модификаций с большими скоростями (10-100 мкм/мин), значительно превышающими характерные скорости соответствующих «классических» - термических, газофазных и электролитических процессов [2-4].

В данной статье для исследования поверхностных слоев сплава после плазменной нитроцементации использован метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Это позволило получить новые результаты, выявить фундаментальные особенности структуры нитроцементованного поверхностного слоя сплава 40ХНЮ.

Цель данной работы - изучение структуры и фазового состава поверхностного слоя сплава 40ХНЮ до и после плазменной химико-термической обработки.

Часть электронно-микроскопических исследований была проведена в научных лабораториях Томского государственного архитектурно-строительного университета (г. Томск, Россия).

В качестве материала исследования использовали образцы дисперсионно-твердеющего сплава 40ХНЮ в исходном состоянии (после закалки 1200 °C, в течение 10 мин.) и после нитроцементации (при 800 °C, в течение 5 мин.). Химический состав сплава представлен в табл. 1 (ГОСТ 14119-85).

Таблица 1

*Химический состав сплава 40ХНЮ, вес.%*

Ni	Cr	Al	C	Fe	Mn	P	S	Si
Основа	39,0-41,0	3,3-3,8	0,03	≤ 0,6	0,1	0,01	0,01	0,1

Для проведения электронно-микроскопических исследований сплава до и после обра-

ботки были выбраны 2 места на образце: 1) приповерхностный слой; 2) 30 мкм от приповерхностного слоя, т.е. в переходной зоне. Для этого на электроискровом станке параллельно нитроцементованной поверхности была вырезана пластинка толщиной 300 мкм (измерения проводились микрометром с точностью  $\pm 0,01$  мкм).

Обработку образцов сплава 40ХНЮ осуществляли на полупромышленной технологической установке, описанной в работах [5, 6].

Ранее в [6, 7] были обсуждены результаты рентгеноструктурного исследования, которые показали, что структура сплава 40ХНЮ до обработки (после закалки при  $T=1200^{\circ}\text{C}$ , 10 мин) состоит из основных  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фаз. Результаты ПЭМ-исследований подтвердили эти данные и дополнительно выявили особенности структуры:  $\gamma$ -фаза - это твердый раствор на основе Ni с гранецентрированной кубической (ГЦК) кристаллической решеткой;  $\alpha$ -фаза - это твердый раствор на основе Cr с объемной кубической (ОЦК) кристаллической решеткой, которая присутствует только внутри зерен  $\gamma$ -фазы (рис. 1).

Внутри крупных зерен  $\gamma$ -фазы часто присутствуют выделения других фаз, а именно: 1) выделения  $\alpha$ -фазы; 2) выделения  $\gamma_0$ -фазы; 3) выделения двух  $\alpha$ - и  $\gamma_0$ -фаз.

В результате проведенных исследований в приповерхностном слое сплава после нитроцементации, кроме  $\gamma$ -,  $\gamma_0$ - и  $\alpha$ -фаз были обнаружены нитрид хрома  $\text{Cr}_2\text{N}$  и карбонитрид  $\text{Cr}_{23}(\text{C},\text{N})_6$  (табл. 2).

Ранее в [8, 9] с помощью количественного рентгенофазового анализа данные фазы также были обнаружены после цементации и нитроцементации в электролитной плазме.

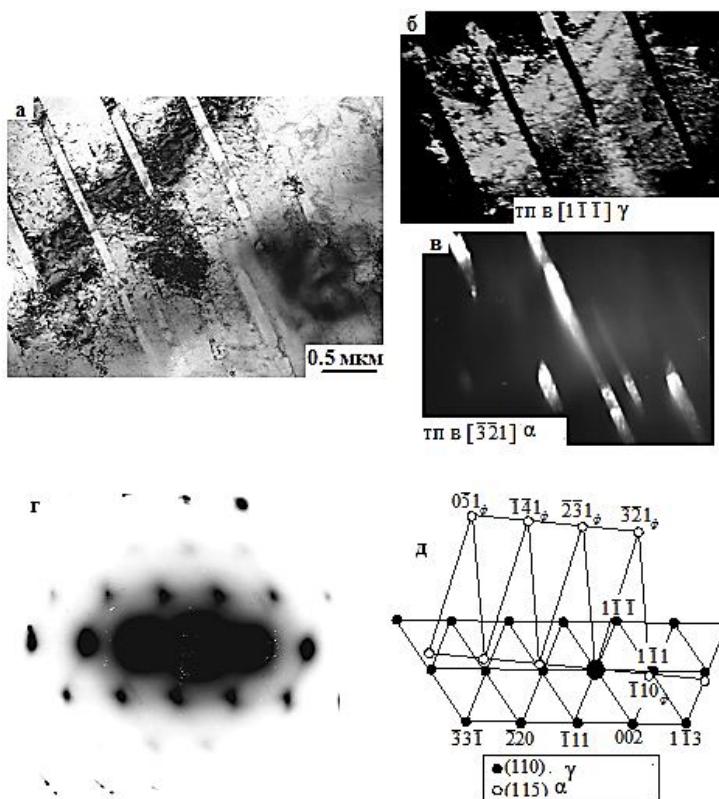


Рисунок 1 - Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава 40ХНЮ в исходном состоянии. Параллельные пластинчатые выделения  $\alpha$ -фазы внутри зерна  $\gamma$ -фазы: а – светлополь-

ное изображение; б – темнопольное изображение (тп), полученное в рефлексе  $[1\bar{1}\bar{1}]$   $\gamma$ -матрицы; в – темнопольное изображение, полученное в рефлексе  $[\bar{3}\bar{2}1]$  фазы  $\alpha$ ; г – микроэлектронограмма, полученная с участка (а); д – её индицированная схема (рефлексы на микроэлектронограмме при-  
надлежат плоскостям (110)  $\gamma$ -матрицы и (115)  $\alpha$ -фазы

Таблица 2

*Тип, пространственная группа и параметры кристаллических решеток  
присутствующих фаз после нитроцементации*

Фаза	Тип кристаллической решетки	Пространственная группа	Параметры кристаллической решетки, нм	
			<i>a</i>	<i>c</i>
$\gamma$	ГЦК	Fm3m		0,3569
$\alpha$	ОЦК	Pm3m		0,288
$\Gamma_0$	ГЦК	Fm3m		0,5737
$Al_2Ni_3$	Тетр.		0,2668	0,3244
$Cr_2N$	ГПУ	R3 1 m	0,48113	0,44841
$M_{23}(C,N)_6$	ГЦК	Fm3m		1,0585

Примечание. М – химические элементы Fe, Cr, Ni, Al.

В центральной зоне нитроцементованного слоя, как и на поверхности, присутствуют  $\gamma$ -,  $\gamma_0$ - и  $\alpha$ -фазы. Основной фазовой составляющей остается  $\gamma$ -фаза. Происходит расслоение твердого раствора  $\gamma_0$ -фазы с последующим выделением частиц нитрида  $Cr_2N$  (рис. 2). Частицы нитрида обладают округлой формой, однако их средний размер несколько ниже (15 нм), меньше и объемная доля (0,6 %).

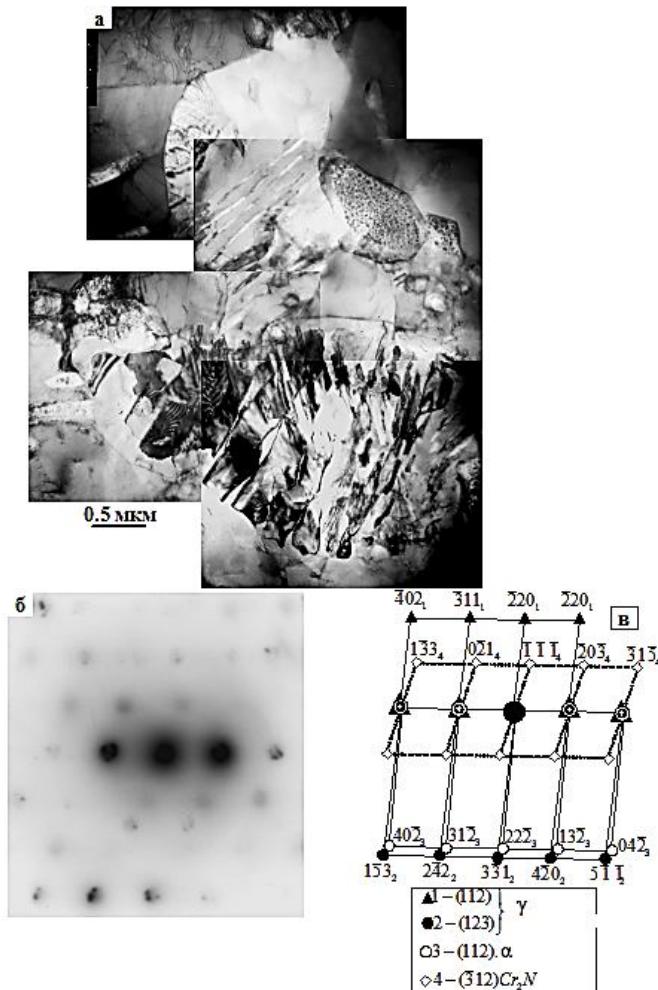


Рисунок 2 - Электронно-микроскопическое изображение сплава 40ХНЮ после нитроцементации. Центральная часть нитроцементованного слоя: а – светлопольное изображение; б – микродифракционная картина, полученная с участка (а); в – её индицированная схема

Хотя  $\alpha$ -фаза и присутствует в зернах  $\gamma$ -фазы, но вид пластин изменяется – они становятся тоньше и дефектнее. Вдоль границ пластин  $\alpha$ -фазы происходит выделение карбонитрида  $\text{Cr}_{23}(\text{C},\text{N})_6$ . Элементарная ячейка этого карбонитрида содержит более 100 атомов, занимающих различные неэквивалентные позиции. Частицы карбида обладают пластинчатой формой, их средний размер  $15 \times 80$  нм, объемная доля в пластинках  $\alpha$ -фазы –  $\sim 1\%$ .

В отличие от поверхности, в центральной части нитроцементованного слоя присутствуют отдельно расположенные, относительно крупные (200 м), обладающие округлой формой частицы карбонитрида  $\text{Cr}_{23}(\text{C},\text{N})_6$ . Эти частицы находятся внутри зерен  $\gamma$ - и  $\gamma_0$ -фаз (рис. 3). Объемная доля их в материале небольшая ( $\sim 0,1\%$ ).

Плазменная химико-термическая обработка привела к изменениям фазового состава и списка присутствующих фаз, а также их морфологии на поверхности нитроцементованного образца и в центральной зоне нитроцементованного слоя (рис. 3).

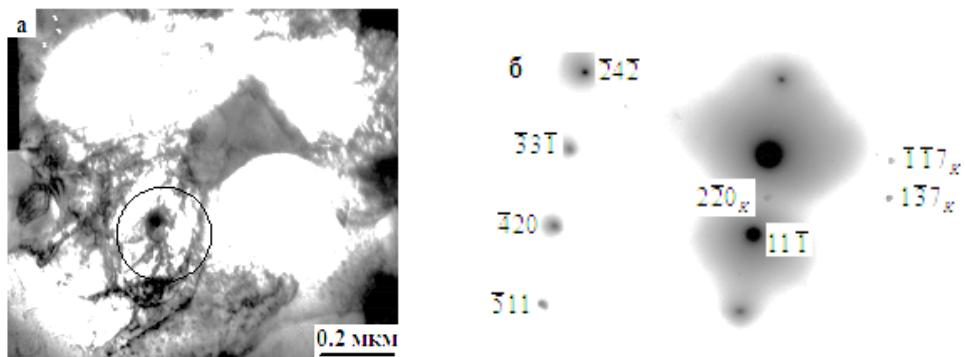


Рисунок 3 - Электронно-микроскопическое изображение матрицы сплава 40ХНЮ после нитроцементации. Центральная часть нитроцементованного слоя образца: а – светлопольное изображение; б – индицированная микродифракционная картина, полученная с центральной части участка, отмеченного на (а) окружностью, присутствуют рефлексы, относящиеся к плоскостям (123)  $\gamma$ -фазы и (772) карбонитрида  $Cr_{23}(C,N)_6$

На основе анализа полученных результатов исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что структура сплава 40ХНЮ в исходном состоянии (после закалки при  $T=1200$  °С, 10 мин) представляет собой многофазную смесь, состоящую из крупных ( $\gamma$ - и  $\alpha$ -фаз) и мелких зерен ( $\gamma_0$ -фазы).
2. Обнаружено, что после плазменной нитроцементации приповерхностный слой сплава 40ХНЮ содержит  $\gamma$ -,  $\gamma_0$ -,  $\alpha$ -фазы, карбид хрома  $Cr_2N$  и карбонитрид  $Cr_{23}(C,N)_6$ .
3. Показано, что обнаруженные после нитроцементации в приповерхностном слое частицы нитрида хрома обладают округлой формой, их средний размер составляет 30 нм, объемная доля – ~3 % и частицы карбонитрида также имеют круглую форму, их средний размер – 200 нм, объемная доля ~0,1 %.

#### Список литературы

1. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: ООО «ТИД book», 2009. – 448 с.
2. Yerokhin A.L., Nie X., Leylandetal A. Plasma electrolysis for surface engineering // Surface and Coatings Technology. – 1999. – V. 122. – P. 73-93.
3. Сараев Ю.Н. Модифицирование покрытий тугоплавкими соединениями с целью повышения эксплуатационной надежности изделий / Ю.Н. Сараев, В.П. Безбородов, А.А. Штерцер и др. // Сварочное производство. – 2011. – №. 7. – С. 24-30.
4. Суминов И.В. Мир материалов и технологий. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / И.В. Суминов, П.Н. Белкин и др. – М.: Техносфера, 2011. – Т. 1. – С. 464.
5. Пат. на полезную модель РК № 878. Установка электролитно-плазменной обработки / М.К. Скаков, А.А. Веригин, Е.Е. Сапатаев и др.; Опубл. 15.11.2012, Бюл. № 11.
6. Ерболатова Г.У. Исследование структурно-фазового состояния и микротвердости сплава 40ХНЮ после азотирования / Г.У. Ерболатова, М.К. Скаков // Сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. «Наука XXI века: теория, практика и перспективы». – Уфа: РИО МЦНИИ ОМЕГА САЙНС, 2015. – 314 с.
7. Ерболатова Г.У. Изменения микроструктуры и механических свойств сплава 40ХНЮ после плазменной химико-термической обработки / Г.У. Ерболатова, М.К. Скаков // Сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. «Научные аспекты современных исследований». – Уфа: РИО МЦНИИ ОМЕГА САЙНС, 2015. – 117 с.
8. Skakov M.K., Yerbolatova G.U., Kantai N., Scheffler M. Investigation of the Influence of Electrolytic-Plasma Processing on Structural-Phase State and Mechanical Properties of the 40CrNiAl Alloy // 2014 International Conference on Frontiers of Energy, Materials and Information Engineering (ICFEMI 2014) will be held in

HongKong, August, 21-22, 2014 (Advanced Materials Research Vols. 1044-1045 (2014) pp. 67-70).

9. Ерболатова Г.У. Влияние нитроцементации на структурно-фазовое состояние и механические свойства сплава 40ХНЮ / Г.У. Ерболатова, М.К. Скаков // Сборник статей Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективы развития науки». - Уфа: РИО МЦНИ ОМЕГА САЙНС, 2015. - 142 с.

Получено 17.09.2015

---

УДК 621.2.082.18

**Л.Г. Журерова**

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

**М.К. Скаков, Э.Г. Батыrbеков, Б.К. Рахадилов**

РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», г. Курчатов

**Н.А. Попова**

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

**МОРФОЛОГИЯ СТРУКТУРЫ СТАЛИ 30ХГСА  
ДО И ПОСЛЕ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ НИТРОЦЕМЕНТАЦИИ**

Известно, что одним из наиболее перспективных способов низкотемпературной плазменной обработки является обработка металлических материалов в плазме дугового разряда, горящего в активной среде химических соединений, в частности химико-термический способ поверхностной обработки материала в катодном режиме электролитно-плазменного воздействия.

Высокоэнергетическое воздействие, к которому можно отнести и электролитно-плазменное упрочнение, заключается в высокоскоростном нагреве до температур выше критических потоком плазмы локального участка поверхностного слоя образца и быстрым его охлаждении, в основном вследствие теплопроводности во внутренние объемы материала, а также теплоотдачи с поверхности. При осуществлении данного способа благодаря дуговому разряду и электролитно-плазменному насыщению приповерхностных слоев атомами химических соединений значительно сокращаются продолжительность обработки, энергозатраты и трудоемкость процесса обработки, тем самым улучшаются эксплуатационные характеристики деталей и изделий.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является изучение морфологии, структурно-фазовых состояний поверхности нитроцементованных образцов стали 30ХГСА, подвергнутых электролитно-плазменному воздействию [1-3].

В качестве материала исследования использовались образцы стали 30ХГСА в состоянии поставки (закалка при 880 °C и отпуск при 540 °C в масле в соответствии с ГОСТ 4543-71) и после электролитно-плазменной нитроцементации. Химический состав стали: 0,28-0,35 % C; 0,8-1,1 % Cr; 0,8-1,1 % Mn; 0,9-1, % Si; 0,025 % P; 0,025 % S, остальное Fe по ГОСТу 4543-71.

Структурно-фазовые исследования образцов стали 30ХГСА проводили в НИИ Нанотехнологий и новых материалов ВКГТУ им. Д. Серикбаева и в научных лабораториях Института материаловедения и соединительных технологий Университета им. Отто фон Гуерике (г. Магдебург, Германия) методами рентгеноструктурного анализа на дифрактометре X'PertPRO в монохроматизированном CuK<sub>α</sub>-излучении, оптической микроскопии на NEOPHOT 21 и AXIOPHOT-2, просвечивающей электронной дифракционной мик-

скопии на тонких фольгах на электронном микроскопе JEOL-2100 с использованием го-ниометрических приставок при ускоряющем напряжении 100 кВ (ТГАСУ, г. Томск, РФ). Рабочее увеличение в колонне микроскопа выбиралось от 10 000 до 50 000 крат. Для про-ведения исследований с помощью электроискровой резки образцы размером  $30 \times 30 \times 8$  мм<sup>3</sup> разрезались на пластинки (фольги) толщиной 0,2-0,3 мм. Полученные фольги утонялись вначале химически в электролите 90 % плавиковой кислоты и 10 % пергидроля, а затем электролитический в пересыщенном растворе ортофосфорной кислоты хромовым ангид-ридом при комнатной температуре, рабочем напряжении 20 В и плотности тока 2-4 А/см<sup>2</sup>.

Определение объемных долей фаз проводили по изображениям, подтвержденным микродифракционными картинами и темнопольными изображениями, полученными в рефлексах соответствующих фаз. Для идентификации фаз использовались схемы микро-дифракционных картин, рассчитанные по табличным значениям параметров кристалли-ческих решеток.

Согласно ранее проведенным металлографическим исследованиям стали 30ХГСА [4-6] в состоянии поставки было установлено, что независимо от обработки образца и места исследования основной фазовой составляющей (матрицей) стали 30ХГСА является  $\alpha$ -фаза разной степени легированности. Сталь 30ХГСА в исходном состоянии относится к ферритно-перлитному классу, в котором содержится ~65 % зерна перлита и 35 % зерна феррита (из них 20 % нефрагментированного и 15 % фрагментированного феррита). Оп-ределено, что морфологически  $\alpha$ -фаза в общем случае присутствует в виде: нефрагмен-тированного и фрагментированного феррита, на границах (со средним размером частиц – 32 нм, объемной долей в материале – ~1 %) и внутри (средним размером частиц – 4 нм, объемной долей в материале – ~0,5 %) которых присутствуют частицы карбida  $M_{23}C_6$ ; пластиначатого перлита, представляющего собой чередующиеся параллельные пластины феррита ( $\alpha$ -фазы) и легированного цементита (хромом до 20 %); отпущеного мартенси-та, представляющего собой смешанную структуру пакетного (реечного) мартенсита, низ-ко- и высокотемпературного пластиначатого мартенсита. Также выявлено, что в исходном состоянии  $\gamma$ -фаза присутствует в виде остаточного аустенита, который присутствует в стали: 1) по границам мартенситных реек и пластин в виде тонких длинных прослоек; 2) внутри мартенситных пластин в виде колоний двойникового типа; 3) в виде отдельных, случайным образом расположенных островков, образованных по типу перлита в резуль-тате расслоения углерода в  $\gamma$ -фазе в окрестности  $\gamma \rightarrow \alpha$ .

Примеры нефрагментированного (рис. 1,*a*) и его схемы (рис. 1,*b*) и фрагментированно-го (рис. 1,*c*) и его схемы (рис. 1,*d*) феррита в исходном состоянии в стали 30ХГСА приве-дены на рис. 1.

Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры стали 30CrMnSiA в исходном состоянии приведено на рис. 2: а – светлопольное изображение ( $\Phi$  – зерно фер-рита,  $\Pi$  – зерно пластиначатого перлита); б – микродифракционная картина и её индици-рованная схема, полученная с зерна феррита, присутствуют рефлексы, относящиеся к плоскости (111) $_{\alpha}$ ; в – микродифракционная картина и её индицированная схема (г), полу-ченная с зерна перлита, присутствуют рефлексы, относящиеся к плоскостям (120) и (137)  $\alpha$ -фазы и (221) цементита  $Fe_3C$ , стрелкой указаны совпадающие направления  $\alpha$ -фазы [001] и цементита [012], т.е. [001] $_{\alpha}$  II [012] $_{Fe_3C}$ , при этом выполняется соотноше-ние: (120) $_{\alpha}$  II (221) $_{Fe_3C}$  (соотношение Багаряцкого) [7].

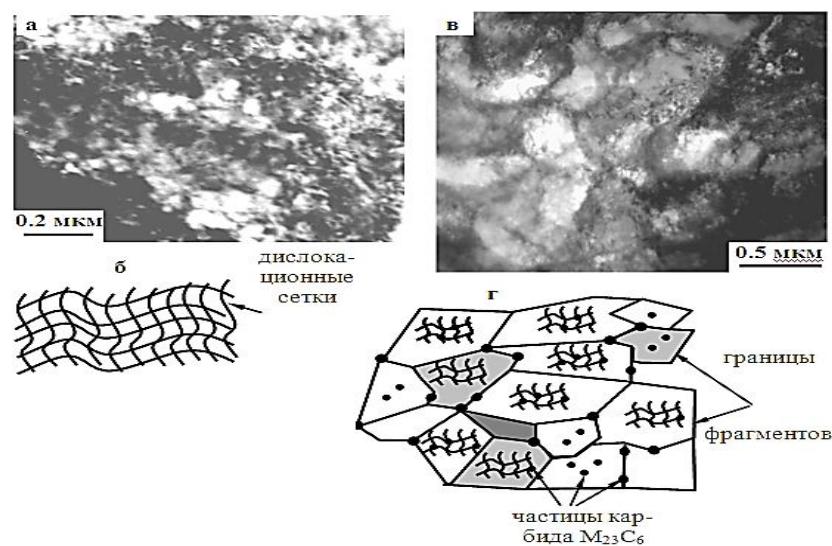


Рисунок 1 - Нефрагментированный и фрагментированный феррит в исходном состоянии стали 30ХГСА

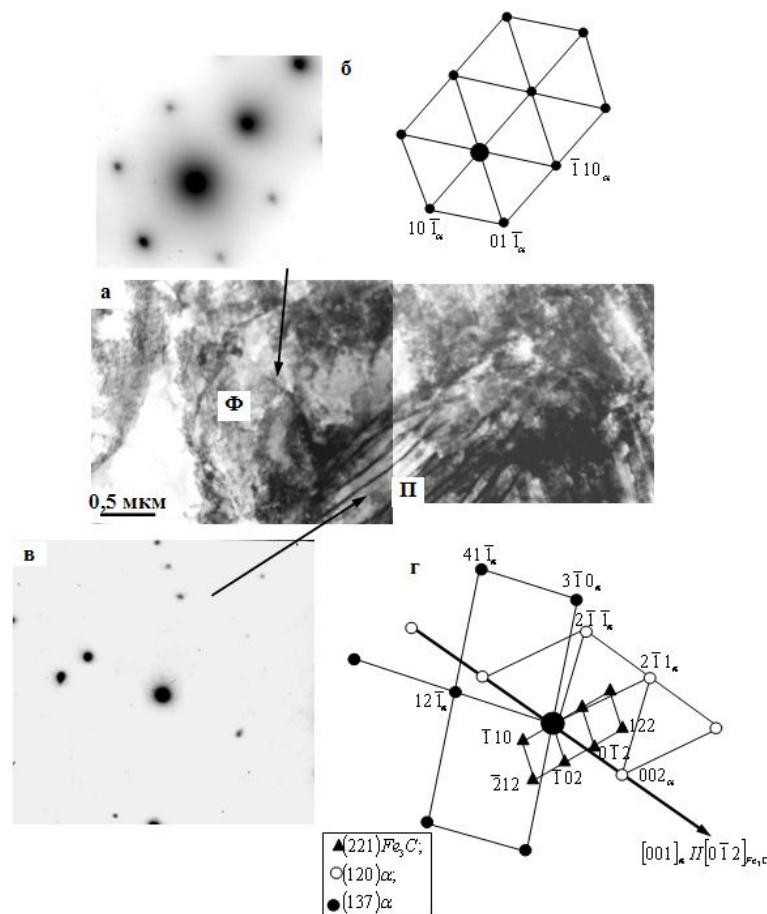


Рисунок 2 - Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры стали 30ХГС

в исходном состоянии

На рис. 3 изображен фрагментированный феррит, где: а – светлопольное изображение; б – микродифракционная картина, полученная с участка (а); в – её индицированная схема, присутствуют рефлексы, относящиеся к плоскостям (113), (115) и ( $\bar{1}12$ )  $\alpha$ -фазы и (221) карбида  $M_{23}C_6$ , обозначенного на схеме как «К». Было определено, что во фрагментированном феррите на границах и внутри присутствуют частицы карбида  $M_{23}C_6$ . Средний размер частиц карбида  $M_{23}C_6$  на границах – 32 нм, с объемной долей в материале  $\sim 1\%$ , так же внутри с размером частиц – 4 нм, объемной долей в материале –  $\sim 0,5\%$ .

Необходимо отметить, что перлитная структура намного прочнее структуры ферритных зерен главным образом потому, что пластины цементита задерживают движение дислокаций так же эффективно, как и границы зерен феррита [8]. Пример разрушенного перлита в стали 30ХГСА в исходном состоянии приведен на рис. 3, где: г – светлопольное изображение; д – темнотпольное изображение, полученное в рефлексе [201] цементита; е – индицированная микродифракционная картина, на которой присутствуют рефлексы, принадлежащие плоскостям (112) $\alpha$  и (23 $\bar{4}$ )  $Fe_3C$ ; ж - схема зерна перлита.

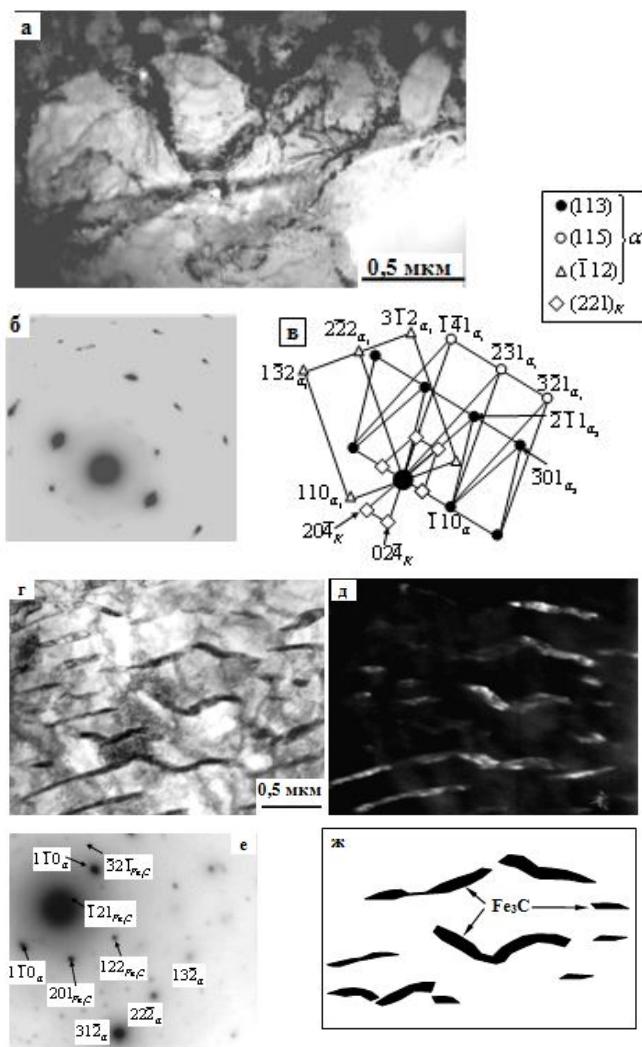


Рисунок 3 - Электронно-микроскопические изображения тонкой структуры фрагментированного феррита и разрушенного перлита в стали 30ХГСА в исходном состоянии

Способ плазменно-электролитической нитроцементации [4-5] образца включает проведение обработки в плазменной дуге при температуре 750 °C в течение 6 мин с составом электролита: 15 % карбамида + 10 % карбоната натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) + 10 % глицерина ( $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$ ) + 65 % воды.

Известно, что нитроцементация стали приводит к существенным качественным и количественным изменениям в структуре, а именно: плотность дефектов, их организация, размеры и тип, а также концентрация легирующих элементов и примесей. Все это приводит к изменению фазового состава и присутствующих фаз, а также их морфологии [7]. Таким образом, и морфология тонкой структуры стали, и фазовый состав на поверхности нитроцементованного образца и в зоне промежуточного слоя должны быть различными. На поверхности образца нитроцементация привела к значительным изменениям в структуре матрицы стали 30ХГСА, которая представляет собой смесь  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз. Электронно-микроскопическое изображение отпущеного реечного, ПНМ – пластинчатого низкотемпературного, ПВМ – высокотемпературного мартенсита приведено на рис. 4, где показано выделение  $\gamma$ -фазы по границам реек, частиц карбонитрида  $\text{M}_{23}(\text{C},\text{N})_6$  – на дислокациях внутри реек: а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение, полученное в совпадающих рефлексах  $[1\bar{1}\bar{1}]_\gamma + [0\bar{1}\bar{1}]_\alpha$ ; в – микродифракционная картина; г – её индицированная схема, присутствуют рефлексы, принадлежащие плоскостям (113) и (133)  $\alpha$ -фазы, (123)  $\gamma$ -фазы и (150) карбонитрида  $\text{M}_{23}(\text{C},\text{N})_6$ , отмеченного на схеме как «К». Остаточный аустенит ( $\gamma$ ) по границам пластины (д) – в виде колоний двойникового типа (е) и островков (ж). Стрелками на (ж) отмечены частицы цементита.

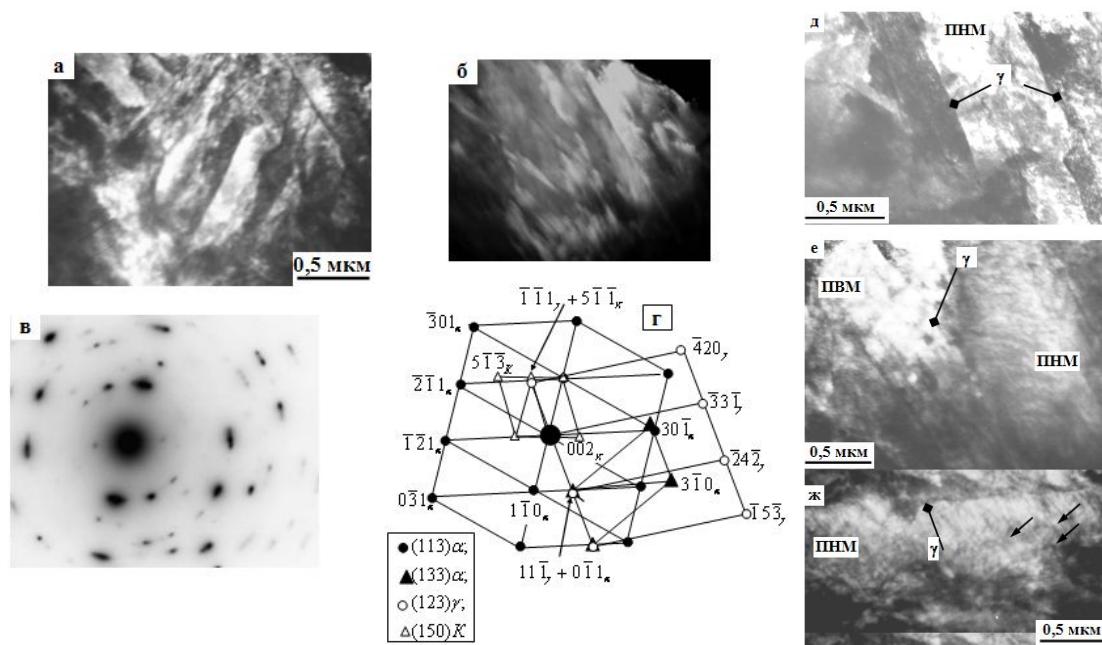


Рисунок 4 - Тонкая структура стали 30ХГСА после нитроцементации, поверхность образца

Примеры электронно-микроскопических изображений отпущенного мартенсита (рис. 5, а, б) и частиц карбонитрида  $\text{M}_{23}(\text{C},\text{N})_6$ , расположенных на межфазных поверхно-

стях «карбонитрид  $M_2C_{0,61}N_{0,39}$  –  $\alpha$ -фаза» (рис. 5,в,г,д), приведены на рис. 5. Как известно, все закаленные и отпущеные слаболегированные низко- и среднеуглеродистые стали обладают смешанной структурой пакетно-пластинчатого мартенсита [8], состоящей, в основном, из пакетного (реечного) мартенсита и некоторого количества пластинчатого мартенсита. Именно такой мартенсит наблюдается в исследуемой стали. Причем качественно [7] и количественно [9] доказано, что пластинчатый мартенсит может быть как низко-, так и высокотемпературным. Основными факторами при формировании смешанной структуры пакетно-пластинчатого мартенсита будут являться концентрация углерода в твердом растворе и температура превращения.

Как видно на светлопольном изображении (рис. 5,в), частицы  $M_{23}(C,N)_6$  имеют пластинчатую форму. Это совершенно новый результат, до сих пор нигде ранее не обнаруженный. Отметим, что карбонитрид  $M_{23}(C,N)_6$  содержит в себе железо и хром, его химическая формула  $(Fe,Cr)_{23}(C,N)_6$ . Имеется информация [10], что хром ярко проявляет себя как карбидообразующий элемент и в данном случае.

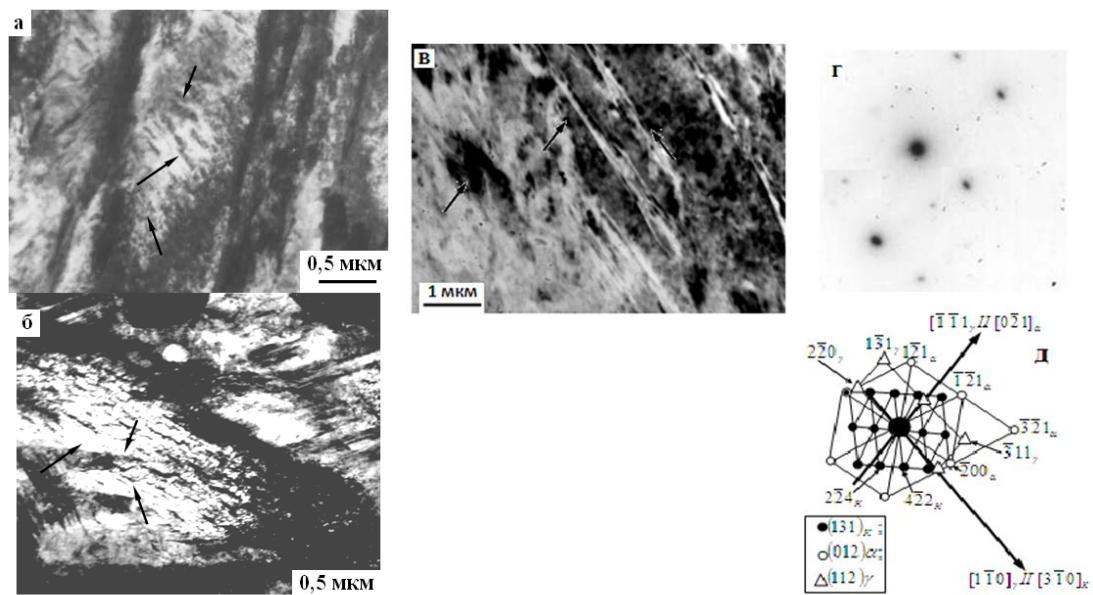


Рисунок 5 - Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры нитроцементованной стали 30ХГСА

Таким образом, на основании анализа полученных результатов исследований морфологии тонкой структуры модифицированных слоев стали 30ХГС до и после плазменно-электролитической нитроцементации можно сделать следующие выводы:

- установлено, что в исходном состоянии тонкая структура стали 30ХГСА представлена смесью зерен феррита и перлита, после нитроцементации на поверхности образца структура  $\alpha$ -матрицы стали состоит из смеси пакетного и пластинчатого (низкотемпературного и высокотемпературного) отпущеного мартенсита;

- определено, что во всех зонах внутри и по границам всех кристаллов  $\alpha$ -фазы присутствуют частицы легированного цементита и карбонитридов типа  $M_2C_{0,61}N_{0,39}$ ,  $M_4(C,N)$ ,  $M_7(C,N)_3$  и  $M_{23}(C,N)_6$ ;

- во всех морфологических составляющих  $\alpha$ -фазы дислокационная структура имеет

вид плотных дислокационных сеток, самое высокое значение скалярной плотности дислокаций имеют кристаллы пакетного отпущеного мартенсита, а в пластинах высокотемпературного отпущеного мартенсита значение  $\rho$  имеет наименьшее значение.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК по проекту «Разработка ресурсосберегающей технологии поверхностного упрочнения стальных деталей железнодорожного транспорта» по договору № 63 от 12 февраля 2015.

#### Список литературы

1. Достовалов Д.В. Перспективные технологии и оборудование для плазменной термической обработки металлов / Д.В. Достовалов, В.А. Достовалов // Технология металлов. - 2011. - № 9. - С. 28-32.
2. Нисс В.С. Устройство осаждения и очистки парожидкостных аэрозолей для ресурсосберегающей и экологически безопасной электролитно-плазменной обработки / В.С. Нисс, А.А. Кособуцкий, Ю.Г. Алексеев и др. // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24-26 нояб. 2010 г. - Минск: БГТУ, 2010. - Ч. 2. - С. 218-221.
3. Фомихина И.В. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхности / И.В. Фомихина, Ю.О. Лисовская, Ю.Г. Алексеев и др. // Сборник докладов междунар. симпозиума «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка», Минск, 25-27 марта. - Минск, 2009. - С. 158-165.
4. 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 (2013). - P. 178-181.
5. Skakov M.K., Zhurerova L.G. Innovative patent #26920 for the invention «Processing means for parts of alloyed steel» at 15.05.2013 bulletin #7.
6. Skakov M., Zhurerova L., Scheffler M. «Influence of Regimes Electrolyte-Plasma Processing on Phase Structure, Mechanical Properties and Wear Resistance of Steel 30CrMnSi», «32th All-Polish Tribology conference Autumnal school of Tribology 2012», г. Вроцлав.
7. Козлов Э.В. Влияние скорости закалки на структуру и количественные параметры мартенситного превращения в литой конструкционной среднелегированной стали / Э.В. Козлов, Н.А. Попова, О.В. Тихонькова и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2005. - № 1. - С. 118-123.
8. Иванов Ю.Ф. Объемная и поверхностная закалка конструкционной стали – морфологический анализ структуры / Ю.Ф. Иванов, Э.В. Козлов // Изв. вузов. Физика. - 2002. - № 3. - С. 5-23.
9. Громов В.Е. Градиентные структурно-фазовые состояния в рельсовой стали / В.Е. Громов, В.А. Бердышев, Э.В. Козлов и др. - М.: Недра коммюникешинас ЛТД, 2000. - 174 с.
10. Козлов Э.В. Градиентные структуры в перлитной стали / Э.В. Козлов, В.Е. Громов, В.В. Коваленко и др. - Новокузнецк: СибГИУ, 2004. - 220 с.

Получено 25.08.2015

---

ӘОЖ 62-83:621.867.2

**Қ.Н. Оразбаев, Ә.К. Ерқоныр, Д.К. Абенова, К.Н. Махатова**  
Ө.А. Байқоныров атындағы Жезқазған университеті, Жезқазған қ.

#### ШАХТАДАҒЫ МАГИСТРАЛЬДЫ КОНВЕЙЕРЛЕРДЕ РЕТТЕЛЕТИН ҚӨПҚОЗФАЛТҚЫШТЫ ЭЛЕКТРЖЕТЕКТЕРИН ҚОЛДАНУДЫҢ НЕГІЗДЕМЕСІ

Қазақстан Республикасының 2012 жылғы 13 қантардағы № 541-IV «Энергияны үнемдеу және энергия тиімділігін арттыру туралы» заңы әрбір электр қондырығыға қатысты электр энергиясын үнемдеу бойынша шараларды құруды қарастырады. Соңдықтан энергияны үнемдеу бойынша барлық ғылыми-техникалық шаралар өндіріске энергияның жоғары тиімділігімен ерекшеленетін жаңа тәсілдер мен құрылғыларды әзірлеуге және енгізуге

бағытталған. Бұл, біріншіден, электржетегі бар электрмеханикалық құрылғыларға қатысты, себебі өндірілетін барлық электр энергиясының 60 %-дан астамы жұмыс механизмдері мен машиналардың, көлік құралдарының электржетектерінде қолданылады. Сондыктан электр энергиясын үнемдеу бойынша шаралардың электржетектері үшін, оның ішінде көпқозғалтқышты асинхронды электржетектері (КАЭЖ) үшін маңызы өте зор.

Ленталы конвейерлер шахта және кен орындарындағы кен тасымалдайтын негізгі көлік ретінде кеңінен пайдаланылады. Магистральды штректерде ленталы конвейерлерді пайдалану кеңінен таралып келеді, бұл шахталардағы оқпан албарына және жер бетінде дейін конвейерлеу проблемасын толығымен шешеді. Онда қолданылатын КАЭЖ электр энергиясын жаппай және кеңінен пайдаланушылар болып табылады [1].

Тау-кен өнеркәсіпптерінде кең қолданылатын ленталы конвейерлердің көбі Ресейде («Уральский конвейерный завод» ЖАҚ, «Курганский машиностроительный завод конвейерного оборудования» АҚ, Миасский конвейерный завод № 1, «Белохолуницкий машстрой завод» ААҚ, «LLC DVS Group» құрамындағы «Транспортёры России» конвейерлік машина құрастыру зауыты); Чехияда («Společnost SE-MI Technology, a.s.», «Společnost PRODECO, a.s.», «ROMiLL, spol. s.r.o.», «OSTROJ a.s.», «PROBET s.r.o.», «ALTA a.s.», «LOŽISKA DRAŠAR, s.r.o.», «Tevco s.r.o.»); Германияда («Maschinenfabrik HESE GmbH», «PURATEK Anlagentechnik GmbH», «Schneider Fördertechnik GmbH», «NISBAU GmbH», «DIA Werke GmbH», «TSUBAKI KABELSCHLEPP GmbH»); Қытайда («Зенит Шанхай тау-кен машинажасау компаниясы» ЖШҚ, «Yantai IMPACT Co., Ltd.», «Zhengzhou Kefid Machinery Co., Ltd.», «SHIBANG MACHINERY» ЖШҚ) және т.б. мемлекеттерде шығарылады. Ленталы конвейерлердің көпқозғалтқышты электржетегі үшін екі, үш жетекті КЛ-Н 1000, КЛ-ПР 1200, КЛ-ПР 1400, ЛУК-200-800/12, Караван-400, УЛТ-100, ЛУК-З, КЛП, ТЛН және т.б. ленталы конвейерлер қолданылады, олардың кейбірінің техникалық мәліметтері 1-кестеде көрсетілген [2-6].

#### 1 - кесте

#### *Ленталы конвейерлердің техникалық мәліметтері*

Лентаның ені, мм	Лентаның қозғалыс жылдамдығы, м/сек	Өнімділігі, м <sup>3</sup> /сек	Айналу моменті, н/м	Электржетек қуаты, кВт
400	0,5-2,0	45-160	360-5200	45-ке дейін
500	0,63-2,0	63-200	360-6800	45-ке дейін
650	0,8-3,15	128-504	360-10000	45-ке дейін
800	0,8-3,5	195-980	1200-34000	165-ке дейін
1000	1,0-3,5	400-1200	1200-53000	480-ге дейін
1200	1,0-3,5	580-2300	1050-53000	750-ге дейін
1400	1,0-3,15	630-2450	1550-53000	750-ге дейін

Шетелдік жерасты ленталы конвейерлердің жеке бөлшектерінің және түйіндерінің әртүрлі типтері және конструкциялары болады. Еуропа елдерінде екі, үш барабанды жетектерімен ленталы конвейерлер жиі қолданылады.

Чехияда көмір шахталары үшін жерасты конвейерлері өнімділіктері 160-400 т/сағ, ені 800 және 1000 мм ленталарымен, 1,25 және 1,5 м/с жылдамдықтың екі сатысымен көмірді участекелік қуақаздармен және көлбеулік қазбалармен тасымалдау үшін сериялап шығарады. Көмірді магистральдық горизонтальды және көлбеулік қазбалардың бойымен тасымалдау үшін өнімділігі жоғары конвейерлер ендірілуде. Бұл конвейерлерде ленталары

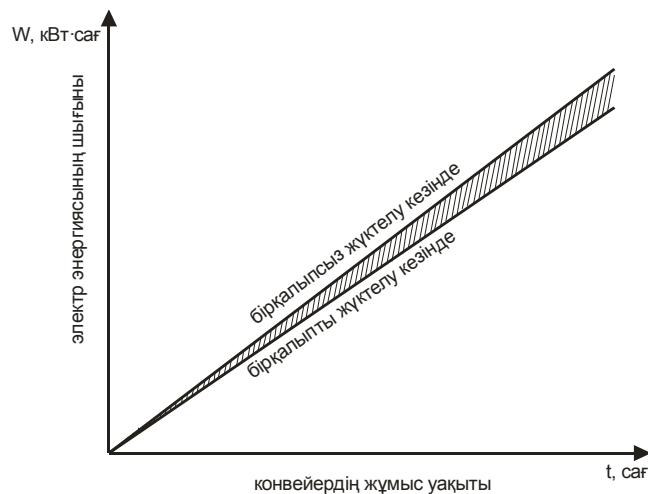
ның ені сақталып, жетектерінің қуаты үлкен, унификацияланған болып келеді, жылдамдықтары да екі сатылы - 2 және 2,5 м/с, ал кейбір конвейерлер жылдамдықтарын 3,15 м/с-қа дейін арттырады да, өнімділігін 900 т/сағ-қа дейін жеткізеді.

АҚШ-та шығарылатын «Гудмен», «Джефри», «Джой» фирмаларының конвейерлері кең қолданылады. Бұл конвейерлердің өнімділігі 55-1360 т/сағ, ені 610-1524 мм лентасымен, лентасының жылдамдығы 1-ден 6 м/с-қа дейін, жетектерінің қуаттары 25-тен 1100 кВт-қа дейін, орнату үзындығы 120-дан бастап 1500 м-ге дейін жетеді.

Негізгі түйіндерінің кеңінен унификациясы және жылдамдығы өзгерісінің көпсатылығы жерасты көпқозғалтқышты ленталы конвейерлердің ерекшелігі болып табылады, себебі конвейерлердің көбісі жылдамдықтың екі сатысымен шығарылады.

Көпқозғалтқышты ленталы конвейерлердің қолданылып жүрген электржетектерінің артықшылықтары мен кемшіліктеріне сараптама жүргізу нәтижесінде ленталы конвейерлердің қолданылып жүрген электржетектері жоғары синхрондаушы қабілеттілігімен жетілдірілген реттелетін жүйелерді қажет етеді деп түйіндеуге болады.

1-суретте ленталы конвейер қозғалтқыштарының бірқалыпты және бірқалыпсыз тараптуы кезіндегі электр энергиясының шығындары көрсетілген. Бұл жерде штрихтаған бөлігі реттелетін көпқозғалтқышты асинхронды электржетегін қолданған кездегі электр энергиясының үнемделуі көрсетілген.

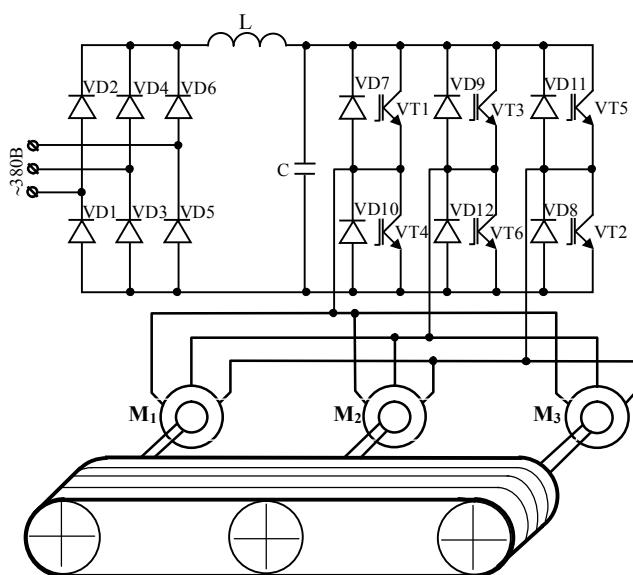


1-сурет – Ленталы конвейердің бірқалыпты және бірқалыпсыз жүктелуі кезіндегі электр энергиясының шығындары

1-суретте көрсетілгендей, синхронды айналатын көпқозғалтқышты асинхронды электржетегін қолданып, ленталы конвейер қозғалтқыштарының жүктемелерін теңестіру арқылы алынатын энергияның үнемделуі айтартылғтай көп емес, бірақ конвейер лентасының жұмыс істеу мерзімі артады, ал ленталы конвейердің бұл элементі оның басты қымбат бөлігі болып табылады.

Конвейер қозғалтқыштарының синхронды іске қосылуын, реттелуін және тежелуін қамтамасыз ететін басқарылуы бар көпқозғалтқышты электржетегі 2-суретте көрсетілген. Берілген электржетегі ортақ жиілік түрлендіргішінен коректенетін, қысқа түйықталған роторлы екі немесе одан да көп асинхронды қозғалтқыштан (АҚ) тұрады. Түрлендіргіш

ретінде кернеудің автономды инверторы бар транзисторлы жиілік түрлендіргіші (КАИ бар ЖТ) қолданылады [7].



2-сурет – Жиілік түрлендіргішті, реттелетін көпқозғалтқышты асинхронды электржетегі

Конвейер үшін жиіліктік реттелетін электржетегін қолдану бірқалыпсыз жүк ағыны кезінде жүк тасымалдау электр энергиясының максималды тиімділігіне, бірнеше козғалтқыштардың синхронды іске қосылуы мен тежелуіне, конвейерде жетектік козғалтқыштар ретінде пайдаланылатын барлық козғалтқыштардың айналу жылдамдығын синхронды баяу реттеуге қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Асинхронды электр козғалтқыштардың айналу жылдамдығын реттеудің жиіліктік тәсілі синхронды айналу жылдамдығы өзгеретін тиімді әрі болашағы зор әдіс болып табылады:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} , \quad (1)$$

мұндағы  $p$  – козғалтқыштың полюс жүптары саны,  $f_1$  – статор орамына келетін  $U_1$  айнымалы ток кернеудің жиілігі ( $f_1=50$  Гц және  $p=1$  кезінде  $\omega_0=314$  рад/с, ол 3000 айн/мин сәйкес келеді).

(1) өрнектен көрініп түрғандай,  $f_1$  жиілігін өзгерте отырып, ротордың айналу жылдамдығын баяу әрі кең реттеуге болады.  $U_1 \approx E_1 = k\Phi f_1$  өрнегінен келіп шығатыны, жиіліктік реттеу кезінде қорек көзі кернеудің амплитудасын реттеу қажеттілігі туындаиды. Егер өзгеріссіз кернеудің жиіліктерін өзгертуге болады, онда ағын жиілікке кері пропорционалды түрде өзгереді. Жиілікті азайтқан кезде, ағын өседі және бұл машина болатының қанығуына алып келеді, козғалтқыштарды қыздыра отырып, жиілік артқан кезде ағын азайып, соның салдарынан рүқсат етілген момент те азаяды.

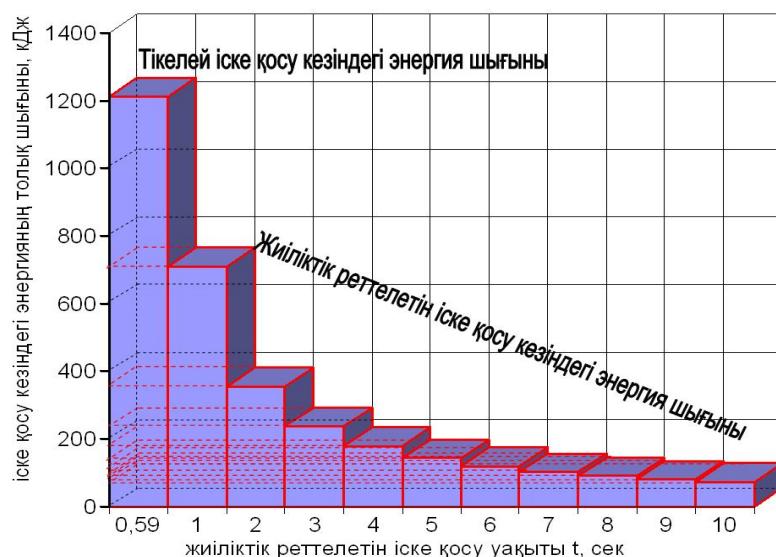
АК-ны тиімдірек қолдану үшін кернеуді бір мезгілде жиілік және жүктеме функциясында реттеу қажет.

Жұктеме түрлеріне байланысты кернеу мен жиілікті басқару зандары әртүрлі болады. Мысалы, тұрақты жұктеме моменті кезінде ( $M_c=const$ ) басқару заны  $\frac{U}{f} = const$ , тұрақты қуат кезінде  $M_c=k\omega^{-1} - \frac{U^2}{f} = const$ , «желдеткіштік» жұктеме кезінде  $M_c=k\omega^{-2} - \frac{U}{f^2} = const$  түріне ие болады.

Конвейерлердің кедергі моменті тұрақты деп есептелінеді, яғни  $M_c=const$ . Бұл жағдайда түрлендіргіштің шығысындағы кернеу мен айнымалы кернеу жиілігін өзгертуді  $\frac{U}{f} = const$  заңы бойынша жүргізу қажет, ол тұрақты ток аралық буыны бар жиілік түрлендіргішімен жоғары дәлдікпен қамтамасыз етіледі.

Берілген схемада жиілік түрлендіргіш екі күштік блок – басқарылмайтын түзеткіш (БТ) және алты транзисторлы кернеудің автономды транзисторлы инверторынан (КАТИ) тұратын тұрақты ток аралық буынымен орындалған. БТ шығысынан тұрақты кернеу LC сүзгілері арқылы КАТИ-ге беріледі, ол өз кезегінде тұрақты кернеуді реттелетін амплитудасы мен жиілігі бар айнымалы кернеуге түрлендіреді. Транзисторлық инвертордың ерекшелігі - инверттеу функциясы мен ендік-импульстік модуляция (ЕИМ) әдісімен кернеуді реттеуді біріктіру, оған қоса синусоидалыға жақын шығыстық токты алу болып табылады. Бұл конвейерде қолданылатын асинхронды қозғалтқыштардың бұрыштық жылдамдығын реттеудің айтарлықтай кең диапазонын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді және оларда кернеудің жоғары гармоникаларынан болатын шығындарды азайтады. Түрлендіргіштер арқылы айналу жылдамдығын реттеу диапазоны транзисторлардың коммутациялау қабілетіне байланысты. IGBT транзисторларын қолданған кезде, айнымалы ток электр машиналары үшін түрлендіргіштің шығысындағы жиілік 400 Гц-ке дейін жетеді [8].

3-суретте ленталы конвейердің үшқозғалтқышты электржетегінің жиіліктік реттелетін іске қосылуы кезіндеңін энергия шығындары көрсетілген.



3-сурет – Ленталы конвейердің үшқозғалтқышты асинхронды электржетегінің іске қосылуын жиіліктік реттеу кезіндеңін энергия шығындары

Демек, қозғалтқыштардың жиіліктік іске қосылуы кезінде энергия шығынының азаюын байқауға болады және де неғұрлым электржетегі баяу іске қосылса, соғұрлым энергияның шығыны азаяды.

Конвейер электржетектерінде жиілігі 0-ден 70 Гц-ке дейін өзгеретін жиілік түрлендіргіштерін қолдану қозғалтқыштардың баяу іске қосылуын, тежелуін, қажет болған жағдайда реттелуін, 30÷50 %-ға дейінгі электр энергия үнемділігін, қуат коэффициентінің 0,9÷1,0-ге дейін жоғарылаудың қамтамасыз етеді.

#### Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Қ.Н. Оразбаев. Ленталы конвейердің көпқозғалтқышты электржетегінің экономикалық тиімділігін арттыру: Техн. ғыл. маг. дисс. - Алматы: Қ.И. Сәтбаев ат. ҚазҰТУ, 2013. - 89 б.
2. <http://ukz-ural.ru>.
3. <http://www.se-mi.cz>.
4. <http://www.puratek.de>.
5. <http://www.zenithcrusher.com>.
6. <http://www.graintechno.com>.
7. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. - М.: Академия, 2004. - 576 б.
8. Ақпанбетов Д.Б. Жерасты ленталы конвейерлерде реттелетін көпқозғалтқышты электр жетектерін қолдану / А.Б. Бекбаев, Д.Б. Ақпанбетов, К.С. Жонкешова, Қ.Н. Оразбаев // Ә.А. Байқоныров ат. ЖезеУ хабаршысы. - 2011. - № 2. - Жезқазған, 2011. - 5-10 б.

Получено 16.06.2015

---

---

ӘОЖ 669.053.4

**Р.А. Рамазанова, Н.В. Серая, Р.А. Быков, Е.Ю. Ван**

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университеті, Өскемен қ.

#### ТОТЫҚҚАН МЫРЫШ КЕНИН КҮКІРТ ҚЫШҚЫЛЫМЕН ЕРІТІНДІЛЕУ ЗЕРТТЕУЛЕРИ

Казіргі кезде мырышты қолдану аймағының ұлғауына байланысты оны тұтыну үздіксіз есіп келеді. Мырышты тұтынудың ортақ жылдық өсімі 10 % құрайды (1).

Сонымен қатар соңғы жылдарды сульфидті полиметалды және мыс-мырышты кендер қорының қыскаруынан және қын байытылатын жартылай тотықкан мырыш құрамды кендерді өндөудің артуы есебінен шикізат қөлемінің төмендеу беталысы анғарылуда.

Мырыш құрамды минералдық шикізаты бар жаңа кенорындарын пайдаланбастан, Қазақстанда мырыш өндіруді сақтап қалу мүмкіндігі бар. Сондықтан «Шаймерден», «Жайрем» және тағы да басқа кенорындарының қын байытылатын сульфидті тотықкан мырыш кендерін өңдеу технологияларын игеру қажет.

Мысалы, «Жайрем» кенорнының кенін өңдеуде кен құрамының тұрақсыздығы және тотықкан минералдардың болуы әсерінен қындық туындауды (2, 3).

«Жайрем» кенорнының карбонаттық мырыш кендері технологиялық қасиеттері бойынша флотациямен қын байытылатын және тиімсіз минералдық шикізат болып табылады. 40-60 °C температурада күкірт натрийімен алдын ала ыстық сульфидизациялау және Андреев-Девис әдісі бойынша мыс купоросымен белсендіру арқылы мырыш карбонаттарының флотациясы он нәтиже көрсете алмады (4).

Мырыш карбонатты кендерін күбілік және шоғырлы ерітінділеу арқылы гидрометаллургиялық өңдеу қаралайым технологиялық көрсеткіштер берді (3).

«Жайрем» кенорнының мырыш карбонаттық кендерін өңдеу кезінде тәменгі технологиялық көрсеткіштер алынуы себебінен олар кенеусіз кендер қатарына жатқызылады (2).

Тотыққан мырыш кендеріне бай «Шаймерден» кенорны Солтүстік-батыс Қазақстанда орналасқан. Бұл кенорны құрамы 27,2-29 % болатын 1,26 млн т мырыш қорын құрайды (5).

«Шаймерден» кенорнының тотыққан кендері мырыш минералдарының карбонаттар мен силикаттар түрінде кездеседі.

«Шаймерден» кенорнының тотыққан мырыш кендерінің құрделі минералдық құрамы минералдық шикізатты нақтылы химиялық талдау кезінде мәселелерін анықтайды. Сонымен қатар мырыштың оксидтік минералдарын байытудың технологиялық көрсеткіштері олардың заттық құрамдарына сәйкес болып табылады.

Бұл жағдайда «Шаймерден» кенорнының құрделі мырышқұрамды минералдық шикізатының заттық құрамын анықтау кезінде келесі зерттеулерге аса көңіл бөлген жөн: берілген шикізаттың минералологиялық, түйіршіктік құрамдарын анықтау, фазалық зерттеу жүргізу және де негізгі физикалық қасиеттерін анықтай білу қажет (6).

Сол себепті тотыққан минералдық шикізаттың құрделі заттық құрамын анықтаудағы комплексті тәсіл, оны өңдеудің оңтайлы технологиясын таңдау кезінде қателіктер жіберу қаупін тудырмайды.

Зерттеу объектісі «Шаймерден» кенорнының тотыққан мырыш кенінің сынамасы болып табылады.

Тотыққан мырыш кенінің (ірілігі +2 мм) бастапқы сынамасын ерітінділеу арқылы негізгі параметрді анықтау (құқырт қышқылының концентрациясы) араластырыш құрылғысы бар реакторда жүргізілді.

Тотыққан мырыш кенінің сынамасын ерітінділеу бойынша тәжірибелер келесі жағдайларда жүргізілді:

- ерітінділеу температурасы: 25 °C;
- ерітінділеу уақыты: 1 сағат;
- қатты фазаның сұйық фазаға қатынасы:  $K : C = 1 : 4$ ;
- құқырт қышқылының концентрациясы, г/л: 20, 30, 40, 50, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200.

Барлық тәжірибелерде кенінің мөлшері 25 г құрады.

Кенді ерітінділеу бойынша тәжірибелер кезінде сыйымдылығы 0,5-0,6 дм<sup>3</sup> ыдыска қажетті көлемдегі (0,1 дм<sup>3</sup>) еріткіш ( $H_2SO_4$ ) құйылды. Бұл қышқыл бастапқы кенге беріліп отырды. Кенді ерітінділеу ыдысына жүктеу үздіксіз араластыру және қыздыру арқылы жузеге асырылып отырды.

Ерітінділеу соында қойыртпақты алдын ала қоюландырмaston сүзуден өткізілді. Қатты фаза (ерітінділеу сүзінділері) сүзгіде фильтрат қалдықтарынан жуылды және кептіргіш шкафта 105 °C температурада тұрақты салмаққа дейін кептірілді.

Өнімді ерітінділерді индуктивті-байланысқан плазмалы масс-спектрометрді қолдана отырып, құрамындағы мырыштың мөлшеріне талдау жасалды. Талдау қорытындылары негізінде ерітіндіге мырыштың шығымы есептелді. Өнімді ерітіндіге шығым дәрежесі 1-кестеде көрсетілген.

Тәжірибелер жүргізу барысында «Шаймерден» кенорнының тотыққан мырыш кенінің құқырт қышқылының концентрациясына тәуелділігі анықталды (1-сурет). Жуықтау және

денгейлестіруді есепке ала отыра, сыйықтық сипаттағы З дәрежелі полиноминалды сыйығы алынды.

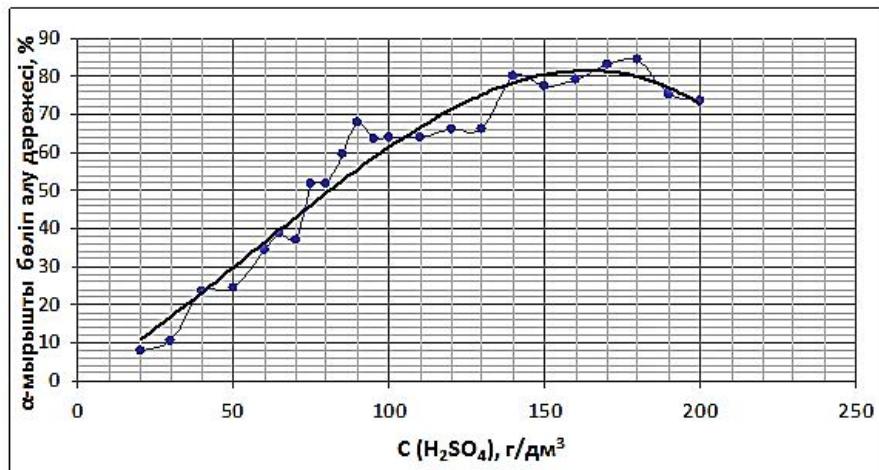
1-сурет бойынша өнімді ерітіндіге бағалы компоненттердің максималды шығымын қамтамасыз ететін құқірт қышқылының оңтайлы концентрациясын байқауға болады. Ен тиімді көрсеткіштер құқірт қышқылы концентрациясының 150-180 г/дм<sup>3</sup> диапазонында орналасқанын көреміз.

### 1-кесте

*Құқірт қышқылының концентрациясына байланысты мырыштың өнімді ерітіндіге шығым дәрежесі*

№	$C(H_2SO_4)$ , г/дм <sup>3</sup>	$V_{\text{фильтрат}}$ , дм <sup>3</sup>	$Zn$ ерітіндегі мөлшері, г/дм <sup>3</sup>	Фильтраттағы $Zn$ мөлшері, г	Сүйық фазаға шығым дәрежесі, %	$m_{\text{ек}}$ , г	Масса шығыны, %
1	20	0,063	7,0	0,441	7,69	24,8910	0,44
2	30	0,056	10,5	0,588	10,25	24,7342	1,06
3	40	0,065	20,6	1,339	23,35	24,0931	3,63
4	50	0,056	25,0	1,400	24,41	24,5427	1,83
5	60	0,066	30,0	1,980	34,52	23,3431	6,63
6	65	0,065	34,0	2,210	38,54	23,2647	6,94
7	70	0,057	37,0	2,109	36,77	24,5017	1,99
8	75	0,069	43,0	2,967	51,73	24,1323	3,47
9	80	0,057	52,0	2,964	51,68	24,7926	0,83
10	85	0,062	55,0	3,410	59,46	23,5821	5,67
11	90	0,072	54,0	3,888	67,79	22,7804	8,88
12	95	0,065	56,0	3,640	63,47	22,7157	9,14
13	100	0,069	53,0	3,657	63,77	23,0826	7,67
14	110	0,063	58,0	3,654	63,71	23,0057	7,98
15	120	0,069	55,0	3,795	66,17	23,6561	5,38
16	130	0,070	54,0	3,780	65,91	23,5115	5,95
17	140	0,082	56,0	4,592	80,07	21,1352	15,46
18	150	0,078	57,0	4,446	77,52	20,8339	16,66
19	160	0,077	59,0	4,543	79,22	20,4724	18,11
20	170	0,078	61,0	4,758	82,96	20,6207	17,52
21	180	0,078	62,0	4,836	84,32	22,3809	10,48
22	190	0,072	60,0	4,320	75,33	23,7088	5,16
23	200	0,068	62,0	4,216	73,51	23,7958	4,82

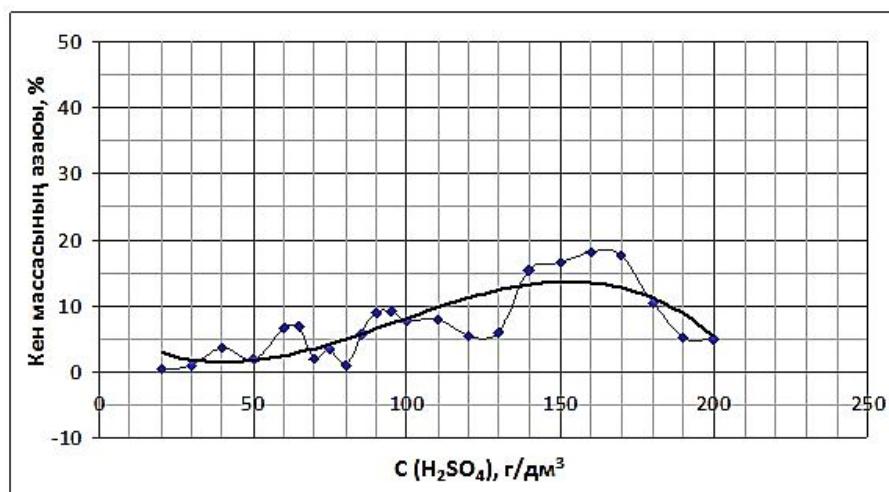
Сонымен қатар  $H_2SO_4$  концентрациясының 20-100 г/дм<sup>3</sup> болуы мырыштың ерітіндіге өту дәрежесінің аз мөлшеріне алып келеді. Бұл жағдай жеткіліксіз жоғары концентрациялы еріткіштер сипаттамаларына тән айқындалған диффузиялық қындықтармен байланысты (10).



1-сурет - Мырыштың өнімді ертіндігे шығым дәрежесінің күкірт қышқылының концентрациясына қатынасы

Анықталғандай, мырышты ертінділеуге күкірт қышқылының концентрациясы 20-100 г/дм<sup>3</sup> болатын ертінділерді қолдану қолайсыз болып табылады. Сондай-ақ концентрациялары 180 г/дм<sup>3</sup> астам ертінділерді пайдалану тиімсіз, себебі бұл жағдай реагенттердің артық шығынына алып келеді және мырыштың ары қарай бөлінуінің артуына мүмкіндік туғызбайды.

Кеннің қышқылдылығын арттыру еki фактормен түсіндіріледі:  $H_2SO_4$  концентрациясының артуымен сорбциялығының жоғарылауы және кендік минералдардың тотықкан күйлерінің толық еруі. Қышқыл концентрациясы өсуінің кеннің қатты массасы мөлшерінің төмендеуіне әсерінің сипаттамасы 2-суретте көрсетілген.



2-сурет - Кеннің масса шығынының күкірт қышқылының концентрациясына қатынасы

«Шаймерден» кенорнының тотықкан мырыш кенінің заттық құрамын зерттеу кезінде оның төмендегідей ерекшеліктері анықталды:

- кеннің ірілік сипаттамасы және жеке ірілік кластары бойынша мырыштың таралуы;
- кен сынамасының минералдық және фазалық құрамының әралуандылығы және

күрделілігі;

- концентрациясы 20-дан бастап 200 г/л дейін күкірт қышқылымен кенді ерітінділеу үдерісінің заңдылықтары;
- күкірт қышқылының жоғарғы үлесті шығынымен жүретін ерітінділеу үдерісінің тәменгі талғамдықта өтуі;
- кеннен мырышты ерітіндіге өткізуге мүмкіндік беретін ерітінділеу үдерісі кезіндегі еріткіштің онтайлы концентрациясы ( $H_2SO_4$  концентрациясы 160 г/дм<sup>3</sup>);
- кеннен мырышты сұйық фазага 79,22 % бөліп алууды қамтамасыз ететін (ерітінді температурасы 25 °C және ерітінділеу ұзақтығы 1 сағат) кенді ерітінділеу жағдайы.

#### Әдебиеттер

1. Тарасов А.В. Гидрометаллургическая переработка цинкового сульфидного сырья / А.В. Тарасов, Л.А. Казанбаев, П.А.Козлов, Э.М. Тимошенко и др. // Цветная металлургия, 2005. - № 4. - 24-29 с.
2. Тян В.Д., Генкин Ю.В., Митряева Н.М. и др. // Геология рудных месторождений. - 1981. - № 2. - 113-118 с.
3. Тян В.Д. Цинковые хемогенные карбонатные руды Жайрема / В.Д. Тян, Н.М. Митряева, М.А. Саденов и др. // Известия АН РК, 1992. - № 4. - 28-35 с.
4. Абрамов А.А. Технология обогащения окисленных и смешанных руд цветных металлов. - М.: Недра, 1986. - 304 с.
5. Palenova Ye.E., Belogub Ye.V., Kotlyarov V.A. Mineralogiya okislennykh rud mestorozhdeniya Shaymerden, Ilmenskoye otdeleniye. IMin, UrORAN, 2008 yes.
6. Филиппова Н.А. Фазовый анализ руд и продуктов их переработки. - М.: Химия, 1975. - 280 с.
7. Болгов Г.П. Мореснетит из полиметаллических месторождений рудного Алтая // Сб. науч. тр. Каз. гос. металлургического инс-та. - Алма-Аты, 1956. - № 13. - 52-58 с.
8. Христофоров Б.С. Поведение мореснетита при определении форм соединений цинка в рудах // Сб. тр. ВНИИцветмета. - М.: Металлургиздат, 1959. - № 5. - 156-157 с.
9. Олевский В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик. - М.: Госгортехиздат, 1963. - 448 с.
10. Колесников А.В., Сычев А.П., Коган И.Ш. и др. // Цветные металлы. - 1981. - № 4. 32-35 с.

Получено 16.07.2015

---

УДК 621.43.068

**Д.Н. Титов, А.Е. Бакланов, Б.Н. Азаматов**

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

#### МЕТОДОЛОГИЯ И АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ И ВЫБОРА КАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАТОРОВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Вопрос об оценке и выборе каталитических материалов для очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания появился в 60-е годы XX века в связи с началом разработки средств снижения загрязнения окружающей среды токсичными веществами.

Был проведен ряд исследований при осуществлении выбора противотоксичных мероприятий для двигателей, в качестве критериев использовали: изменение выбросов  $C_xH_y$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ , изменение суммарной токсичности, дополнительной массы автомобиля, затрат на производство, эксплуатационных затрат [1].

При сравнении различных двигателей внутреннего сгорания американскими специа-

листами устанавливалась система балльной оценки [2], а в число параметров оценки включалось: удовлетворение нормам токсичности; расхода топлива; шумность; безопасность; пусковые качества; технологичность и другие [3].

Рассматривая задачу выбора материала с позиций материаловедения, необходимо учитывать, в зависимости от назначения материала, его функциональные свойства. Если он не обеспечивает функциональных свойств, его не следует рассматривать далее как конкурентоспособный. Поэтому методология должна выводить в число сравниваемых только функционально-конкурентные материалы, а далее сужать перечень сравниваемых.

Исходя из положений системного анализа, был разработан метод оценки и выбора каталитических материалов для нейтрализаторов отработавших газов, базирующийся на теории логики оценок и исследования операций [4], сформированы требования к оценке, соблюдение которых дает возможность использовать в различных отраслях знаний квадратиметрический метод. Требования представляют собой следующие:

1. Всесторонность, т.е. возможность учета всех характеристик материалов, как тех, которые поддаются физическим измерениям, так и тех, которые считаются неизмеримыми.
2. Критичность и чувствительность общей оценки к изменению любого единичного критерия оценки и выбора материала.
3. Монотонность, т.е. плавное изменение значения любого из критериев должно приводить к монотонному изменению значения общей оценки.
4. Объективность, т.е. обеспечение решающего значения оценок, характеризующих снижение вредных выбросов при очистке газов в нейтрализаторах.
5. Безошибочность, т.е. максимальное уменьшение вероятности того, что может быть выбран нелучший вариант или выделены нелучшие варианты из рассматриваемых.
6. Доказательность, т.е. методология и результаты оценок на всех этапах их получения должны базироваться на данных об испытаниях, должна существовать система доказательств и обоснование процедур получения оценок.

На основе сформулированных выше требований было принято решение об использовании при решении задач оценки и выбора каталитических материалов для нейтрализаторов отработавших газов положений и методов теории операций [4] путем сведения решений к определению ведущих стратегий в условиях полной определенности.

Оценка и выбор каталитических материалов для использования в нейтрализаторах отработавших газов предусматривает сбор сведений по важнейшим показателям, определяющим круг критериев оценки в зависимости от требований, предъявляемых к системам очистки Правилом 49(05) ЕЭК ООН, которые сводятся к следующим:

- каталитические материалы должны иметь высокую пористость, проницаемость, извилистость пор и не создавать противодавлений свыше 0,1 МПа;
- должны иметь развитую удельную поверхность свыше  $1 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;
- должны иметь диапазоны рабочих температур в пределах 380...950 К;
- должны иметь стойкость к агрессивным средам;
- должны обладать фильтрующими свойствами и удерживать не менее 90 % твердых частиц с размерами не менее 3 мкм;
- должны обладать вибростойкостью и выдерживать колебания до 150 Гц с частотами;
- должны выдерживать удары;
- должны обеспечивать отсутствие износа катализаторов и частиц носителей;
- должны обладать основными функциональными свойствами по очистке отработавших газов: от оксидов азота – не менее чем на 65-75 %, оксида углерода – на 80 %, углеводородов – на 80 %, твердых частиц – на 90 %.

На основании требований были сформулированы группы критериев оценки.

Основной группой критериев определена вызывающая ингредиентные загрязнения, вызванные воздействием совокупности химических веществ, количественно и качественно чуждых естественным биоценозам. Ввиду того, что законодательствами ведущих промышленных стран и ЕЭК ООН установлены уровни допустимых выбросов, то было определено в качестве критериев использовать уровни превышения норм выбросов оксида углерода ( $CO$ ), оксидов азота ( $NOx$ ), углеродов ( $C_xHy$ ), твердых частиц (ТЧ). Дополнительно в число критериев возможно включение уровня выбросов 3,4 бенз- $\alpha$ -пирена (БАП) или (ПАУ) [5].

Практически во всех описаниях систем каталитической очистки отработавших газов отсутствуют сведения о воздействии на шум и вибрацию. Это обстоятельство не дает возможности проведения сравнений по шумовым и вибрационным критериям.

Влияние каталитической очистки отработавших газов на тепловые выбросы дизелей практически отсутствуют. Поэтому в состав экологических критериев параметры теплового излучения и тепловых выбросов включать нецелесообразно.

В результате отбора критериев по оценке способов повышения эффективности каталитической очистки отработавших газов дизелей сложилась система, представленная на рис. 1.

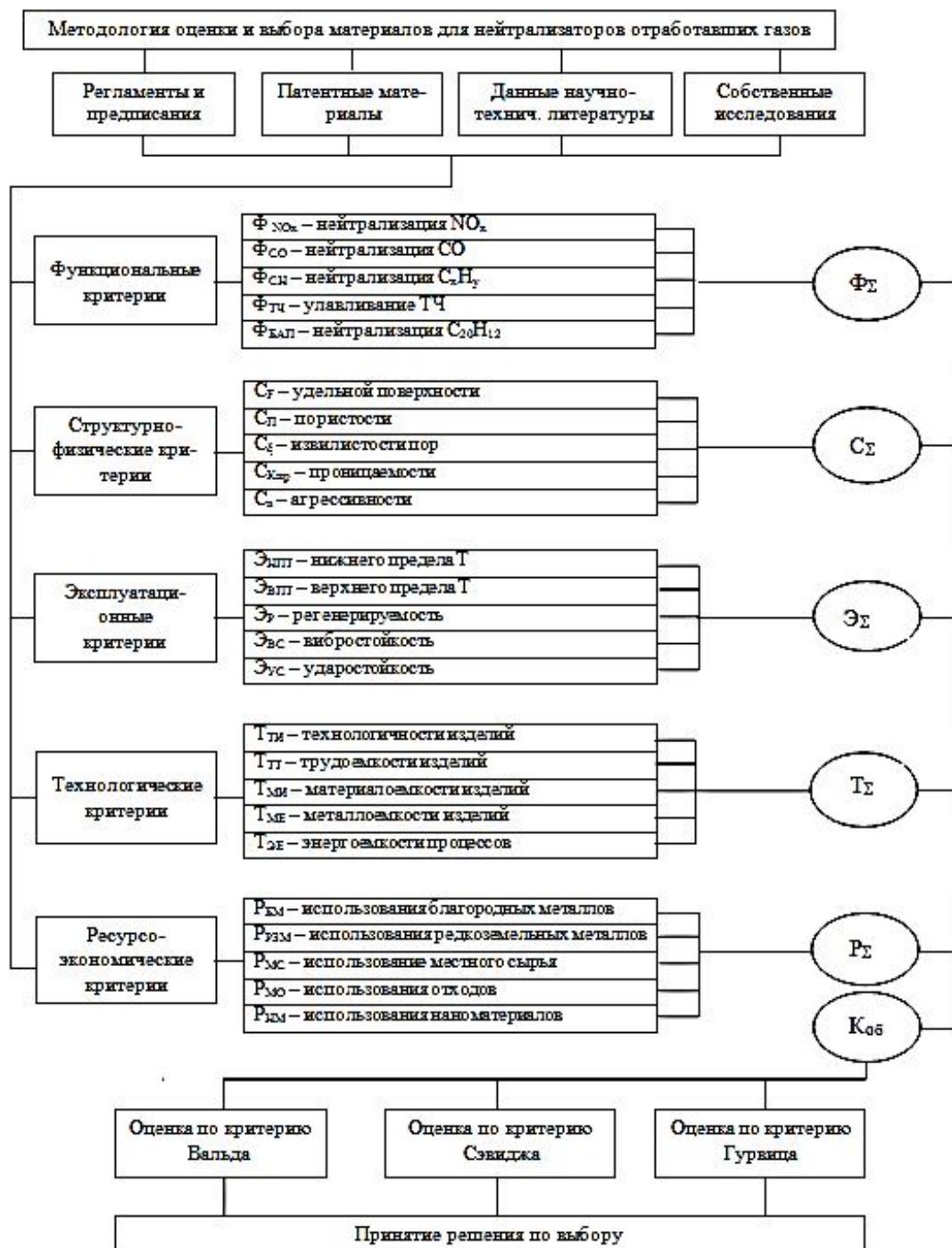


Рисунок 1 - Методология оценки и выбора материалов

Разработаны группы критериев, в том числе функциональных, структурно-физических, эксплуатационных, технологических, ресурсно-технологических.

Группы критериев были представлены в следующем виде:

1. Функциональные: обеспечения нейтрализации оксидов азота –  $\Phi_{NO_x}$ ; обеспечения нейтрализации оксида углерода –  $\Phi_{CO}$ ; обеспечения нейтрализации углеводородов (суммарно) –  $\Phi_{CH_4}$ ; обеспечения улавливания твердых частиц –  $\Phi_{Tq}$ .

2. Структурно-физические: развитости удельной поверхности материала –  $C_{up}$ ; пористости материала –  $C_{im}$ ; проницаемости материала –  $C_p$ ; извилистости пор в материале –  $C_{ip}$ ; температуростойкости материала –  $C_{tc}$ .

3. Эксплуатационные: нижнего предела рабочих температур –  $\mathcal{E}_{NP}$ ; верхнего предела рабочих температур –  $\mathcal{E}_{VP}$ ; стойкости к агрессивной среде –  $\mathcal{E}_{AC}$ ; вибростойкости –  $\mathcal{E}_{BC}$ ; ударостойкости –  $\mathcal{E}_{yc}$ .

4. Технологические: технологичности изделий –  $T_{ti}$ ; трудоемкости изделий –  $T_{TT}$ ; материалоемкости изделий –  $T_{MC}$ ; металлоемкости изделий –  $T_{ME}$ ; энергоемкости процессов –  $T_{EE}$ .

5. Ресурсно-технологические: использования благородных металлов –  $P_{BM}$ ; использования редкоземельных металлов –  $P_{RZM}$ ; использования местного сырья –  $P_{MC}$ ; использования отходов металлообработки –  $P_{MO}$ ; использования наноматериалов –  $P_{NM}$ .

Используя результаты оценок по опубликованным данным собственных исследований, экспертных оценок, обобщенный критерий оценки и выбора материалов, а также метод теории операций и математической логики, разработан алгоритм расчета.

Алгоритм решения задач оценки и выбора каталитических материалов для очистки газов представляет собой последовательность и содержание действий, которые выглядят следующим образом:

1. Отбираются характеристики известных материалов, используемых в устройствах для очистки газов.

2. Определяются критерии оценки материалов и отбираются наиболее значимые и определяющие.

3. Критерии разбиваются на группы.

4. Путем экспертных оценок определяются веса критериев в зависимости от выбранной системы оценки.

5. На основании характеристик по пункту 1 все отобранные виды материалов ранжируются по каждому из выбранных критериев.

6. Производится приведение критериев путем умножения их на значения весомости.

7. Для каждого из сравниваемых материалов находятся произведения приведенных критериев.

8. Вычисляются значения среднего геометрического из произведений приведенных критериев и получаются приведенные значения обобщенного критерия.

9. Производится оценка по максимальному критерию Вальда.

10. Производится оценка по минимальному критерию Сэвиджа.

11. Производится оценка по критерию пессимизма – оптимизма Гурвица.

12. Данные оценок по пунктам 8-11 сравниваются и принимаются решения, которые, в свою очередь, ранжируются.

Таким образом, определяются базовые решения для улучшения материалов и технологий.

Значения обобщенного критерия рассчитываются по выражению

$$K_{OB} = \left( \prod_{i=1}^{\xi} (a_i \cdot \Phi_i) \cdot \prod_{i=1}^k (b_i \cdot C_i) \cdot \prod_{i=1}^l (d_i \cdot \mathcal{E}_i) \cdot \prod_{i=1}^v (q_i \cdot T_i) \cdot \prod_{i=1}^w (z_i \cdot P_i) \right)^{\frac{1}{x}}, \quad (1)$$

где  $a_1, \dots, a_\xi; b_1, \dots, b_k; d_1, \dots, d_l; q_1, \dots, q_v; z_1, \dots, z_w$  - коэффициенты весомости критериев (рис. 2);  $\xi, k, l, v, w$  - количество оценочных критериев,  $x$  - общее количество критериев.

Правильность оценки проверяется по ряду критериев. По максимальному критерию Вальда оценка гарантирует выигрыш не меньше, чем низшая оценка:

$$\alpha_v = \max_i \min_j t_{ij}. \quad (2)$$

Проверка по минимальному критерию Сэвиджа показывает выигрышные варианты решений, при которых величина риска в наихудших условиях минимальна:

$$S_{\text{S}} = \max_{\text{I}} \min_{\text{J}} r_{ij}. \quad (3)$$

Проверка по критерию пессимизма – оптимизма Гурвица по выражению:

$$H_G = \max \left( \eta \cdot \min_i t_{ij} + (1-\eta) \cdot \max_j t_{ij} \right), \quad (4)$$

где  $\eta$  - коэффициент пессимизма;  $t$  – оценочный показатель.

Воспользоваться описанным методом можно лишь в случаях полноты необходимых данных в научно-технической информации или в случае повторения экспериментальных исследований в целях восполнения необходимых данных. Поэтому было принято решение об использовании метода до и после сравнительных испытаний, проведенных на основании отбора каталитических материалов для нейтрализаторов отработавших газов на основе анализа данных научно-технической литературы и проведенных исследований.

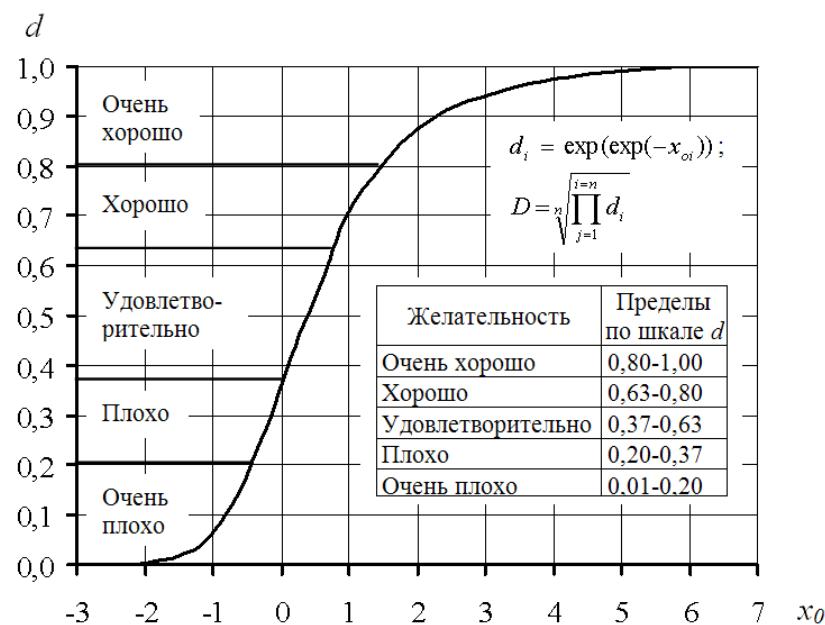


Рисунок 2 – Распределение оценок весомости отдельных критериев при оценке и выборе материалов для каталитической очистки газов в условиях неполной определенности

Результаты оценки каталитических материалов для нейтрализаторов отработавших газов на основе предложенного метода приведены в таблице.

*Оценка качеств материалов,  
используемых для очистки газов от вредных веществ*

№	Каталитические материалы	Предпочтительные материалы
1	Ячеистый кордиеритный материал с пропиткой катализатором	
2	Пористый проницаемый материал (пенометалл из монеля)	**
3	Спеченная смесь активированных оксидов и РЗМ	
4	Пористый микрокристаллический материал (порошковая металлургия)	****
5	Тугоплавкие неорганические оксиды (спеченные)	***
6	Пористый проницаемый материал на основе пентаксида Ванадия	
7	Тугоплавкие пористые 3-мерные структуры на основе оксида циркония	
8	Пористые проницаемые металлокерамики на основе столбчатых глин	
9	Композитный материал на основе кордиерита и карбида	*****
10	Пористая проницаемая алюминеникелевая система (спеченная)	
11	Композиты на основе оксидов металлов и Pt	*****
12	Композиты на основе окалины стали (СВС-технологии)	*
13	Кварцевое микроволокно с нанесенным катализатором	
14	Минеральное волокно из SiO с покрытием РЗМ и Pt и Pd	
15	Слоистые спеченные минеральные волокна с катализатором	
16	Композиты муллита в термореактивной смоле	

Список литературы

1. Автомобильный справочник. - Пер. с англ. - 1-е изд. - М.: «За рулем», 2000. - 896 с.
2. Яханов В.В. Автомобиль – источник загрязнения атмосферы / В.В. Яханов, Ю.Р. Абдрахимов, Е.А. Наумкин // Промышленная экология: проблемы и перспективы: Материалы науч.-практ. конф., 21 нояб. 2001. - Уфа: Изд-во Ин-та нефтехимперераб., 2001. - С. 78-79.
3. Aeberhardt Benedikt. Partikelfilter für moderne Dieselmotoren // Techn. Rdsch. - 2012. - № 17. - С. 1-4.
4. Вентцель Е.С. Исследование операций: Задачи, принципы, методология. - М.: Наука, 1980. - 208 с.
5. Мельберт А.А. Повышение экологической безопасности поршневых двигателей. - Новосибирск: Наука, 2010. - 170 с.

Получено 27.09.2015

УДК 621.812

**Zocher Klaus-Peter Walter**

Technische Universität Ilmenau (Germany)

**М.В. Дудкин, К.К. Комбаев**

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

**ADAPTIVE UND SELEKTIVE MONTAGE (ASM) –  
EFFEKTIVE MONTAGETECHNOLOGIE IN DER FLEXIBLEN FERTIGUNG**

### *Einführung*

Die ständige Verbesserung der Qualität herzustellender Erzeugnisse bei gleichzeitigem Senken der Qualitätskosten ist eine permanente Herausforderung nicht nur an die Teile- und Bau-gruppenfertigung sowie Montage, sondern vor allem auch an die Erzeugnisentwicklung und Fertigungsplanung (Bild 1).

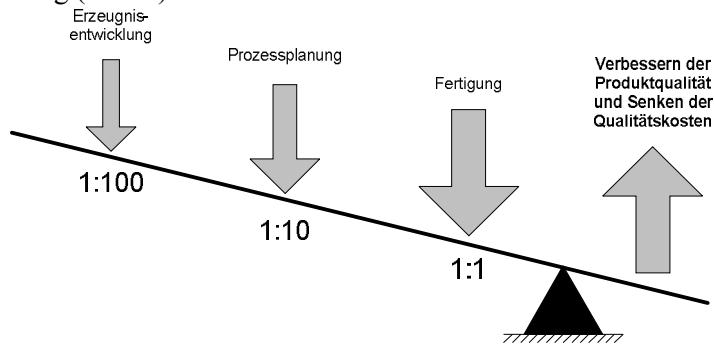


Bild 1 - Verbessern der Produktqualität und Senken der Qualitätskosten

Die Einflussmöglichkeiten in der Montage am Ende der Prozesskette, Erzeugnisentwicklung – Prozessplanung – Fertigung sind erheblich eingeschränkt. Ein weit höheres Potenzial besteht in der Erzeugnisentwicklung durch fertigungsgerechte Dimensionierung und Tolerierung wesentlichen Einfluss auf eine kostengünstige Fertigung und Montage zu nehmen. Nur unzureichend wird bei den üblichen Tolerierungsmethoden das zufällige Zusammentreffen von Einzelteilen und Baugruppen in der Serienmontage berücksichtigt. Die Adaptive und Selektive Montage (ASM) als moderne Montagetechnologie gewährleistet höchste Präzision in der serienmäßigen Baugruppenmontage bei gleichzeitiger Senkung der Qualitätskosten.

### *Toleranzmodell als Grundlage der ASM*

Qualitätsmerkmale hergestellter Teile, Baugruppen und Erzeugnisse charakterisieren geometrische und/oder stoffliche oder auch funktionelle Eigenschaften. An technologische Kollektive (statistische Menge wie Los, Charge, Posten, ...) gebundene Qualitätsmerkmale werden als Zufallsgrößen mit X oder Y charakterisiert und deren Realisierungen mit  $x_1, x_2, \dots$  bzw.  $y_1, y_2, \dots$  bezeichnet. Ein beliebiges Qualitätsmerkmal X ist innerhalb der Toleranzgrenzen  $x_{\min}$  und  $x_{\max}$  (auch mit K und G bezeichnet) durch seine Realisierungen x mit der Verteilungsdichte  $\varphi(x)$  als Zufallsgröße charakterisiert (Bild 2). Die Maßtoleranz für das Qualitätsmerkmal X wird mit T und das Toleranzmittmaß mit C bezeichnet. Der Nennwert  $x^*$  des Qualitätsmerkmals X ist in dieser Darstellung mit dem Toleranzmittmaß  $C = x^*$  identisch. Die absolute Toleranz  $\Delta X$  ist damit als halbe Toleranzbandbreite vorgegeben und die relative, prozentuale Toleranz  $\delta X$  als dimensionslose Größe  $\delta X = \Delta X/x^*$  definiert. Toleranzrechnungsmethoden bei Annahme der Gleichverteilung  $\varphi_1(x)$  aller Realisierungen x des Qualitätsmerkmals X garantieren die vollständige Austauschbarkeit in der Montage. Dafür werden mit der Maximum-Minimum-Methode die ungünstigen Kombinationen beim zufälligen Zusammenbau in der Montage zugrunde gelegt. Toleranzrechnungsmethoden mit angenommener Normalverteilung  $\varphi_2(x)$  der Realisierungen x des Qualitätsmerkmals X innerhalb der Maßtoleranz T gewährleisten nur eine unvollständige Austauschbarkeit beim zufälligen Zusammenbau in der Montage.

Die Realisierung des Qualitätsmerkmals X innerhalb der zulässigen Toleranz  $\Delta X$  bzw.  $\delta X$  ist das notwendige Kriterium der ‚Qualitätssichernden Fertigungsgestaltung und – steuerung‘.

Die Darstellung im Bild 2 zeigt, dass das notwendige Kriterium durch eine Gleichverteilung des Qualitätsmerkmals X erfüllt wird. Die Realisierung möglichst vieler hergestellter technischer Gebilde in unmittelbarer Nähe des Nennwertes und damit weniger an den Toleranzbandgrenzen, ist eine einleuchtende Forderung. Daher ist die Sicherung bestimmter Verteilungsdichten der zufälligen Qualitätsmerkmale innerhalb der zulässigen Toleranzen das hinreichende Kriterium. Damit ist die Normalverteilungsdichte  $\varphi_N(x)$  das angestrebte Ziel der ‚Qualitätssichernden Fertigungsgestaltung und -steuerung‘ [1].

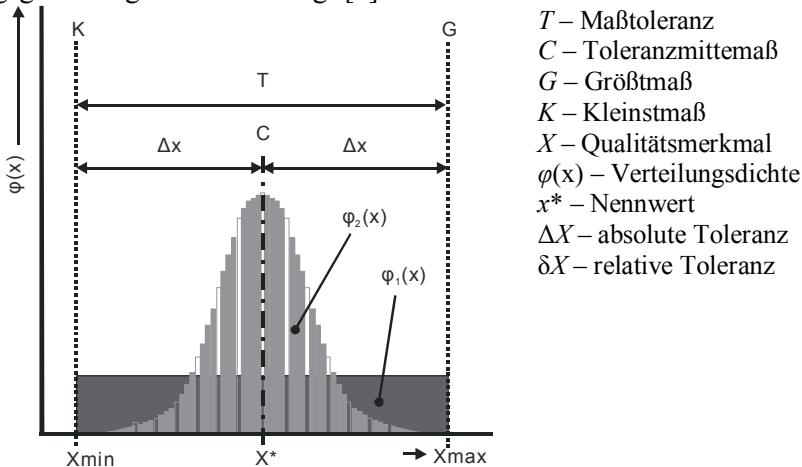


Bild 2 - Toleranz T und Verteilungsdichte  $\varphi(x)$  eines beliebigen Qualitätsmerkmals X

Qualitätsmerkmale von Baugruppen werden mit Y bezeichnet. Für die Baugruppenmontage ist die funktionelle Abhängigkeit  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$  des Qualitätsmerkmals Y der Baugruppe von den Qualitätsmerkmalen  $X_i$  ( $i \in \{1, \dots, n\}$ ) zu montierenden Bauelementen und Einzelteile Grundlage des Toleranzmodells. Die Qualitätsmerkmale Y der Baugruppen sind damit durch mehrdimensionale Verteilungen charakterisiert. Das allgemeine Toleranzmodell (1), beschreibt den Zusammenhang der Funktionstoleranzen  $\delta Y$  der Qualitätsmerkmale Y der Baugruppe und den Fertigungstoleranzen  $\delta X_i$  der Qualitätsmerkmale  $X_i$  der zu montierenden Bauelementen und Einzelteile [1], [4]:

$$\delta Y \leq \sum_{i=1}^n |\alpha_i| \delta X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |\beta_{ij}| \delta X_i \delta X_j, \quad \text{für alle } k \in \{1, \dots, m\} \text{ und } i \in \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

$\alpha_i$  bzw.  $\beta_{ij}$  sind die Gewichtskoeffizienten 1. bzw. 2. Ordnung:

$$\alpha_i = \frac{\partial f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i^*}{y^*}, \quad \beta_{ij} = \frac{\partial^2 f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i \partial x_j} \cdot \frac{x_i^* x_j^*}{y^*}. \quad (2)$$

Das allgemeine Streuungsfortpflanzungsmodell (3):

$$\sigma_Y^2 * = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \sigma_{X_i}^{2*} + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n \rho_{ij} \sigma_i^* \sigma_j^* \quad \text{bzw.} \quad \sigma_Y^2 * = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \sigma_{X_i}^{2*} \quad \text{für } \rho_{ij} = 0 \quad (3)$$

folgt nach Normierung des Streuungsfortpflanzungsgesetzes:

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_n)}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{X_i}^2 + 2 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_n)}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_n)}{\partial X_j} \text{cov}\{X_i, X_j\}$$

mit den quadrierten Nennwerten  $x_i^{*2}$  und  $y^{*2}$ .  $\rho_{ij}$  ist der Korrelationskoeffizient zwischen paarweise abhängigen Qualitätsmerkmalen  $X_i$  und  $X_j$ .

Toleranzmodell (1) und Streuungsfortpflanzungsmodell (3) sind die allgemeine Grundlage der Toleranzrechnungsmethoden und Toleranzgruppenoptimierung bei der Adaptiven und Selektiven Montage.

#### Prinzip der ASM

Das Prinzip der ASM von Baugruppen (BG) bestehend aus Bauelementen (BE) und Einzelteilen (ET) wurde bereits vor 25 Jahren als rechnerunterstützte Montagetechnologie von Zocher vorgestellt. Das Messen (eigen)gefertigter und (zu)gelieferter Bauelemente (BE) und Einzelteile (ET), die Bestimmung von Toleranzgruppen und der zielgerichtete Zusammenbau unter Echtzeitbedingungen in der informell verketteten flexiblen Teilefertigung und Montage sind Wesensmerkmale der ASM (Bild 3).

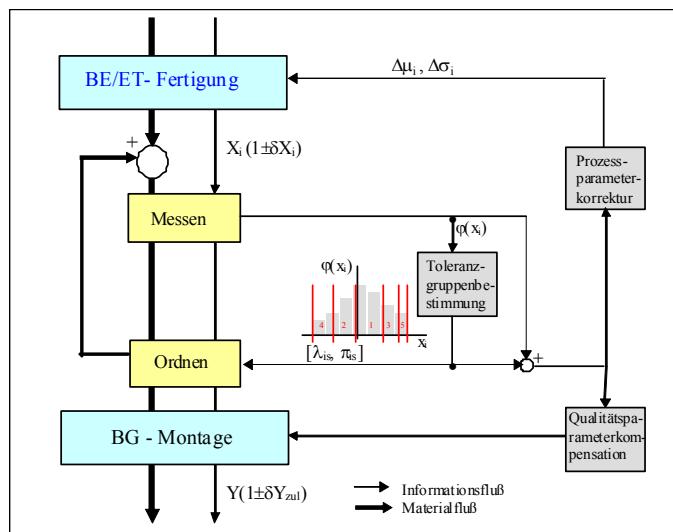


Bild 3 - Prinzip der Adaptiven und Selektiven Montage

Das Prinzip der ASM beruht auf der:

- Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $\varphi(x_i)$  der Qualitätsmerkmale  $X_i$  gefertigter und angelieferter Bauelemente und Einzelteile;
- Bestimmung geeigneter Toleranzgruppengrenzen  $[\lambda_{is}, \pi_{is}]$  zur Sicherung der zulässigen Funktionstoleranzen  $\delta Y_{zul}$  der Qualitätsmerkmale  $Y$  zu montierender Baugruppen;
- Korrektur der Prozessparameter ( $\Delta\mu, \Delta\sigma$ ) infolge zeitvarianter Zustandsänderungen der Teilefertigungsprozesse und Neuberechnung der Toleranzgruppengrenzen und Kompensation von Abweichungen der Qualitätsparameter in der Montage unter Berücksichtigung der Zwischenspeicher- und Verbrauchssituation der BE und ET.

Die Baugruppenmontage auf der Grundlage vorbestimmter Toleranzgruppen der Bauelemente und Einzelteile charakterisiert die *selektive* Komponente, während die Baugruppenmontage bei zielgerichteter Beeinflussung der Prozessparameter in der

Bauelemente- und Einzelteilefertigung zur Realisierung bestimmter Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $\varphi(x_i)$  über den Fertigungstoleranzen  $\delta X_i$  einschließlich Kompensation von Abweichungen der Qualitätsparameter als *adaptive* Komponente der ASM bezeichnet wird [1].

Die ASM ermöglicht eine hohe Typenflexibilität in der Montage. Eine rechnergeführte, flexible ASM-Zelle entwickelt sich zunehmend zur Steuerzentrale der technischen und logistischen Qualitätssicherung in der informell verketteten Teilefertigung und Montage auch unter Einbeziehung der Zulieferfertigung und unter Berücksichtigung spezifischer Kundenwünsche. Im Bild 4 sind Komponenten einer automatisierten, rechnergeführten ASM-Zelle zur typenflexiblen Montage von Kugellagerndargestellt (Bild 4).

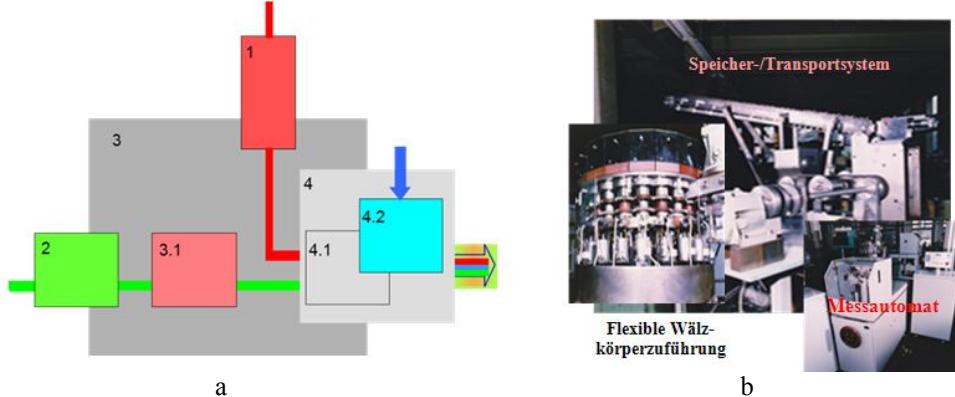


Bild 4 - Muster einer flexiblen ASM-Zelle in der Wälzlagereinfüllung (a – Schema: 1 - IR-Messautomat; 2 - AR-Messautomat; 3 - Speicher-/Transportsystem; 4 - Montagestation; 4.1 - Montageautomat; 4.2 - Wälzkörperführungsleitung; b – Montagezelle)

Die eigengefertigten Innen- und Außenringe werden nur dann gepaart, wenn mit den zugelieferten, (nicht immer vollständig) verfügbaren Kugeln (20 Maßgruppen jeweils um  $1\mu\text{m}$  gestuft) ein Lager des Typs  $C_2$ ,  $C_N$ ,  $C_3$  oder  $C_4$  entsprechend des momentanen Fertigungsplanes montiert werden kann. Ansonsten wird der Außenring im Zwischenspeicher abgelegt. Zwischenspeicher- und Maßgruppensituation bestimmen die rechnergeführte Rückkopplung (Prozessparameterkorrektur) auf die vorgelagerte Ringfertigung [2].

Für die Motorgebläsefertigung wurde die Unwuchtkompensation zwischen Anker und Laufrad als effektive Montagetechnologie untersucht und im Labor demonstriert [3]. Dazu ist es notwendig die Unwucht von Anker und Laufrad zu erfassen und in der Montagezelle – nach Feststellung von Betrag und Lage der Ankerunwucht – die mit den vorher gemessenen und nach Toleranzgruppen geordneten Laufrädern zu kompensieren (Bild 5).

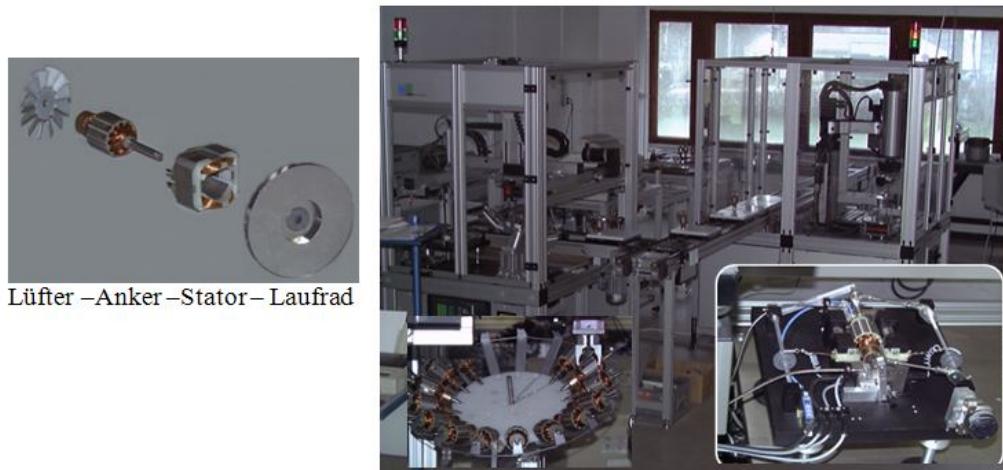


Bild 5 - Anker-/Laufrad-Montagezellem mit integrierter Unwucht-Messung

Die gemessenen Daten werden auf Transpondern unter den Werkstückträgern von Station zu Station ein- und ausgelesen. Grundvoraussetzung ist immer die Toleranzgruppenbestimmung mit ASM-OPT 320, die unter Echtzeitbedingungen und Berücksichtigung der realen Wahrscheinlichkeitsverteilungen erfolgt [4].

*Lehr- und Forschungslaboratorium «Flexible Montage»*

Am Lehrstuhl Technologie des Gerätebaus der St. Petersburger Nationalen Forschungsuniversität für Informationstechnologie, Mechanik und Optik (NIU ITMO) wurde in den letzten Jahren ein Lehr- und Forschungslaboratorium «Flexible Montage» konzipiert und realisiert, das der Aus- und Weiterbildung sowie universitären Forschung dient.

Im Bild 6 werden erforderliche Arbeitsstationen der flexiblen Montagelinie für den Ersteinsatzfall Mikroskopobjektive schematisch dargestellt [5]. Sie sind durch ein flexibles Transfersystem miteinander verbunden, das gemeinsam mit mobilen Zwischenspeichern (ZSP) den Materialfluss mittels auf Shuttles transportierten Paletten realisiert. Der mobile Zwischenspeicher kann auch als stationäres Lager genutzt werden. Die Entnahme bzw. Ablage der Paletten kann sowohl manuell als auch durch Industrieroboter erfolgen. Die Anordnung der Weichen ermöglicht einen separaten Betrieb der Baugruppenmontage (Kleben von Linse und Fassung einschließlich Messstationen für optische und mechanische Parameter) und der Mikroskopobjektivmontage (Korpus-, Objektiv- und Endmontage einschließlich Prüfstation). Die Zu- und Abführung des Materials mittels Paletten mit mobilem Zwischenspeicher erlaubt auch eine räumliche Trennung, wenn z.B. die Baugruppenmontage im Reinraum realisiert wird.

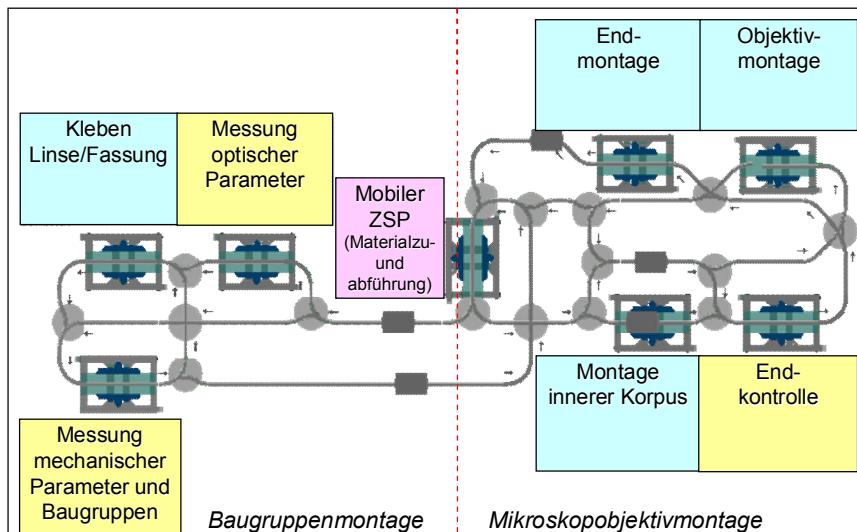


Bild 6 - Arbeitsstationen der Labor-Montagelinie für Mikroskopobjektive

Die Vielzahl zu erfassender und zu verarbeitender Daten der Mess-, Handhabe- und Montagevorgänge in den einzelnen Arbeitsstationen durch die RFID-Technik rationell dezentral erfasst und durch den Stationscomputer verarbeitet und gesteuert. Die Paletten der mobilen Zwischenspeicher für BE und ET sowie BG der Mikroskopobjektive sind mit Transpondern ausgerüstet und ermöglichen mit weiteren Komponenten der RFID-Technik (Antenne sowie Schreib- und Leseeinrichtung) eine rationelle Informationserfassung und -verarbeitung der Mess- und Positionsdaten aller bewegten Objekte für die rechnerunterstützte Montage. Auf einer Palette (ca. 200 x 300 mm) können je nach Größe bis zu 300 Objekte abgelegt werden. Die formschlüssigen Einlagen sind den Objektkonturen angepasst und mit unterschiedlichen Konturen auch für mehrere Objekttypen ausgelegt sein. Die Einlagen können mit jeder Palette bewegt werden; an der Unterseite der Palette sind Transponder befestigt, die alle erforderlichen Daten (Typ, Position, Messwerte, ...) enthalten.

An den einzelnen Arbeitsstationen können an mehreren Paletten gleichzeitig Daten ein- und ausgelesen werden. Je größer die verfügbare Anzahl aller erforderlichen optomechanischen und mechanischen Baugruppen und Einzelteile zur Montage von Mikroskopobjektiven desto sicherer die Toleranzgruppenbestimmung und damit die zielgerichtet reduzierten Kombinationsmöglichkeiten. Die mittels Shuttles transportierten Paletten können durch das flexible Transfersystem an/von jeder Arbeitsstation zu jeder anderen Station bewegt, oder im mobilen ZSP abgelegt werden. Eine zentrale Steuerung regelt bedarfsgerecht den Materialfluss zwischen den Arbeitsstationen sowie stationären Lagern/mobilen ZSP. In der Mikroskopobjektivmontage lassen sich durch selektive Montage und adaptive Qualitätsparameterkompensation mittels mathematischer Modelle erhebliche Einsparungspotentiale erreichen.

#### *Toleranzgruppenbestimmung für das Beispiel „Welle–Buchse“*

In jüngster Zeit wurden in der Zeitschrift „ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING, INSTRUMENT-MAKING“, ISSN 0202-3350 durch Sorokin, M.A. [6] mehrere Artikel (2011: Nr. 8; 2012: Nr. 1, 5, 9; 2013: Nr. 1, 3, 10; 2014: Nr. 1) zur Selektiven Montage von Erzeugnissen des Typs «Welle – Buchse» publiziert. Ausführlich werden mathematische Grundlagen der Selektiven Montage behandelt. Konkrete Berechnungen werden

nicht dargestellt, so dass ein direkter Vergleich nicht ASM-OPT nicht möglich ist (Bild 7).

$$d_1 = 10^{+0,006}_{-0,006} \text{ mm}$$

$$d_2 = 10^{-0,010}_{-0,022} \text{ mm}$$


---

mit :

$$d_2^* = 9,984^{+0,006}_{-0,006} \text{ mm}$$

folgt:

$$y^* = 0,016^{+0,002}_{-0,002} \text{ mm}$$

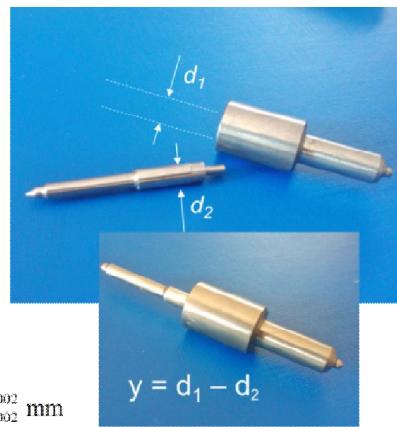


Bild 7 - Beispiel „Buchse – Welle“

Deshalb wurde mit der vorgegebenen Dimensionierung nach Bild 7 mit ASM-OPT 320 eine Toleranzgruppenbestimmung durchgeführt.

d <sub>1</sub> =10,000 ± 0,006 mm δd <sub>1</sub> = ±0,06%				d <sub>2</sub> = 9,984 ± 0,006 mm δd <sub>2</sub> = ± 0,06%				y*=0,016 ± 0,002 mm δy* <sub>zul</sub> = ±12,5 %				
s	λ <sub>1S</sub>	π <sub>1S</sub>	F <sub>1S</sub> [%]	s	λ <sub>2S</sub>	π <sub>2S</sub>	F <sub>1S</sub> [%]	s	π <sub>1S-π<sub>2S</sub></sub>	λ <sub>1S-λ<sub>2S</sub></sub>	λ <sub>1S-π<sub>2S</sub></sub>	π <sub>1S-λ<sub>2S</sub></sub>
1	9,9990	10,0001	37,26	1	9,9830	9,9850	37,23	1	0,0160	0,0160	0,0140	0,0180
2	9,9970	9,9990	23,83	2	9,9810	9,9830	23,80	2	0,0160	0,0160	0,0140	0,0180
3	10,0010	10,0030	23,71	3	9,9850	9,9870	23,72	3	0,0160	0,0160	0,0140	0,0180
4	9,9950	0,9970	7,03	4	9,9791	9,9810	7,02	4	0,0160	0,0159	0,0140	0,0179
5	10,0030	10,0050	6,99	5	0,9870	9,9888	7,00	5	0,0162	0,0160	0,0142	0,0180
6	0,9940	9,9950	0,59	6	0,9781	9,9791	0,59	6	0,0159	0,0159	0,0149	0,0169
7	10,0050	10,0060	0,60	7	0,9888	9,9898	0,60	7	0,0162	0,0162	0,0152	0,0172
			100%					100%				

Annahme: Normalverteilung für φ(d<sub>1</sub>) und φ(d<sub>2</sub>), c<sub>p</sub>=1,33

Bild 8 - Ergebnis der Toleranzgruppenbestimmung mit ASM-OPT 320

Bei angenommener Normalverteilung für φ(d<sub>1</sub>) und φ(d<sub>2</sub>) mit c<sub>p</sub>=1,3 sind die ermittelten Toleranzgruppengrenzen [λ<sub>1S</sub>, π<sub>1S</sub>] und [λ<sub>1S</sub>, π<sub>1S</sub>] der 7 Toleranzgruppen für die Selektive Montage von Buchse und Welle in Tabelle (Bild 8) das *Ergebnis der Toleranzgruppenbestimmung mit ASM-OPT 320*. Alle Buchsen und Wellen können bei Realisierung der zulässigen Toleranzen 0,014mm ≤ y\* ≤ 0,018 montiert werden. Eine weitere Einengung der zulässigen Toleranz δy\*<sub>zul</sub> = ±0,625 % (y\*=0,016 ± 0,0001 mm) bei gleichzeitiger Erweiterung der Fertigungstoleranzen δ<sub>d1,2</sub> = ±0,1...1 % wäre ohne Erhöhung des technologischen Aufwandes möglich. Allerdings erhöht sich dann auch die Anzahl der Toleranzgruppen. Nach Eingabe der Ausgangsdaten dauerte die Berechnung der Toleranzgruppen in Bild 8 mit ASM-OPT 320 weniger als 1 Sekunde. Bei M.A. Sorokin [6] werden sogenannte *Selektive Intervalle* vorgegeben und dafür mögliche Kombinationen für die Montage bestimmt; eine in der Großserien- und Massenfertigung praktizierte Vorgehensweise der Selektiven Montage.

#### Schlussbemerkungen

Die flexible Fertigung und Montage unter dem Aspekt der technischen und logistischen Qualitätssicherung ermöglicht die Umsetzung des Prinzips der Adaptiven und Selektiven Mon-

tage als effektive Montagetechnologie. Das Messen (eigen)gefertigter und (zu)gelieferter Bauelemente und Einzelteile, die Bestimmung und Neuberechnung von Toleranzgruppen, der zielgerichtete Zusammenbau unter Echtzeitbedingungen in der informell verketteten flexiblen Teilefertigung und Montage, die Qualitätsparameterkompensation und Prozessparameterkorrektur infolge zeitvarianter Zustandsänderungen der Teilefertigungsprozesse sowie Zwischenspeicher- und Verbrauchssituation der Bauelemente und Einzelteile sind Wesensmerkmale der Adaptiven und Selektiven Montage. Die aufgezeigten Einsatzfälle unterstreichen die Notwendigkeit zunehmend flexibler Systemlösungen für die Bauelemente-/Teilefertigung und Montage insbesondere in der Mittel- und Kleinserienfertigung.

#### Literatur

1. Zocher K.-P.: Methoden der Toleranzrechnung und Toleranzoptimierung. In: Qualitätsmanagement für Ingenieure, S. 254-278, 3. Auflage, Hanser Verlag 2012, ISBN 978-3-446-41784-7.
2. Zocher K.-P. u.a.: Verfahren und Vorrichtung zur Erhöhung des Paarungserfolges bei der Montage von Baugruppen, vorzugsweise bei der Wälzlagermontage. Patentschrift WP B23 P/299 527 3 vom 29.1.1987.
3. Zocher K.-P., Grabow J., Szczesny D.: Unwuchtkompensation durch Adaptive und Selektive Montage (ASM). In: 41. IWK TU Ilmenau 1996, Band 1, S.323-328.
4. Zocher K.-P., Kosub S., Görsch D.: Toleranzgruppenoptimierung für die Adaptive und Selektive Montage. In: 44. IWK TU Ilmenau 1999, Band 3 - Vortragsreihe Produktion und Logistik, S. 463-468.
5. Zocher K.-P.: Adaptive und Selektive Mikroskopobjektivmontage. In: Broschüre «Workshop - Flexible Montage» an der TU Ilmenau vom 09.-10.03.2010, S.5-11.
6. Sorokin M.A., Anurov J.N.: Selektive Montage von Erzeugnissen des Typs «Welle - Buchse. In: «ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING, INSTRUMENT-MAKING», ISSN 0202-3350 (2011: Nr. 8; 2012: Nr. 1, 5, 9; 2013: Nr. 1, 3, 10; 2014: Nr. 3).

Получено 10.09.15

---

---