

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кривошеев А.Е. Литые валки (теоретические и технологические основы производства).– М.: Металлургиздат, 1957.– 360 с.
2. Иванова Л.Х. Комплексномодифицированные валковые чугуны / Л.Х. Иванова, Я.С. Маймур, И.А. Осипенко, А.П. Белый, Д.В. Муха// Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: Зб. наук. праць. 2014.– № 1(32), С.75-79.
3. Иванова Л.Х. Редкоземельные металлы в валковых чугунах/ Л.Х. Иванова, Е.В. Колотило// Процессы и технологии литья: коллективная монография/ Под ред. В.Е.Хричикова.– Дніпропетровськ: «Літограф», 2015.– С.66-78.
6. Проблемы получения чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом в условиях вальцелитейного производства/ Е.В.Колотило, Л.Ф.Боков, Л.Х.Иванова, Н.Г.Мороз// Прогрессивные технологические процессы и охрана труда в литейно-металлургическом производстве. – Нижний Новгород, 1991. – С.19-20.
5. А.с. 1311846 СССР, МКИ<sup>3</sup> В22D 19/16. Способ обработки чугуна при изготовлении прокатных валков/ Е.В. Колотило, Л.Х. Иванова, И.И. АнуфриевЮ, Н.Н. Овчинников и др. (СССР).– № 3821258/22-02; заявл. 10.12.84; опубл. 23.05.87. Бюл. №19.– 3 с.
6. Колотило Е.В., Иванова Л.Х., Бунина Ю.К. Технология производства прокатных валков из комплексномодифицированных чугунов с шаровидной формой графитных включений // Теория и практика металлургии. –2000.–№ 6.–С.45–49.
7. Пат. 93800 Україна, МПК<sup>7</sup> В22D 25/00.Спосіб лиття прокатних валків з чавуну з вермикулярним графітом/Хричиков В.Є., Иванова Л.Х., Колотило Є.В., Шляпін І.В., Хазанов А.В., Івонін І.В (Україна); заявник та патентовласник Націон. метал. акад.. України. – з. 200913016; Заявл. 14.12.09; Опубл. 10.03.11, Бюл. № 6. – 5 с.
8. Пат. 104762 Україна, МПК<sup>7</sup> В22D 25/00.Спосіб лиття прокатних валків з чавуну з вермикулярним графітом/ Иванова Л.Х., Колотило Є.В., Хричиков В.Є., Маймур Я.С., Муха Д.В., Калашнікова А.Ю, Бура Ю.М (Україна); заявник та патентовласник Націон. метал. акад.. України. – з. 201211584; Заявл. 08.10.12; Опубл. 25.02.14, Бюл. № 4. – 5 с.
9. Пат. 111223 Україна, МПК<sup>7</sup> В22D 25/00.Спосіб лиття прокатних валків з чавуну з вермикулярним графітом/ Иванова Л.Х., Колотило Є.В., Хричиков В.Є., Хитько О.Ю., Шапран Л.О., Муха Д.В., Гілуч М.А. (Україна); заявник та патентовласник Націон. метал. акад.. України. – з. 201402950; Заявл. 27.03.14; Опубл. 11.04.16, Бюл. № 7. – 5 с.
10. Иванова Л.Х. Экологический анализ технологии литья прокатных валков исполнения ЛШ-57/ Л.Х. Иванова, Я.С. Маймур // Теория и практика металлургии.– 2012.– № 3 (86).–.89-92.

УДК 621.785.532

**ОСОБЕННОСТИ ВАКУУМНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ  
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ****С.А. Пахомова<sup>1</sup>, Р.С. Фахуртдинов<sup>2</sup>, М.Ю. Рыжова<sup>3</sup>**<sup>1, 2</sup> кандидат технических наук, доцент, e-mail: [vladisl-2013@yandex.ru](mailto:vladisl-2013@yandex.ru)<sup>3</sup> старший преподаватель e-mail: [mgtu2013@yandex.ru](mailto:mgtu2013@yandex.ru)<sup>1, 2, 3</sup> кафедра «Материаловедение», Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Россия

**Аннотация.** Выполнено сравнение способов газовой цементации по обеспечению качества обработки на основе анализа показателей применяемой технологической атмосферы – уровню углеродного потенциала, возможности его контроля и коэффициенту массопереноса. Показана эффективность вакуумной цементации, при которой рациональная технологическая атмосфера сочетается с преимуществами автоматизированного технологического оборудования, в котором совмещают процесс цементации с «сухой» закалкой в потоке азота высокого давления.

Долговечность и надежность цементованных деталей имеют решающее значение для оборудования горнодобывающей промышленности.

**Ключевые слова:** технологическая атмосфера, сравнительный анализ, способы цементации: газовая, вакуумная, ионная.

## FEATURES VACUUM CARBURIZING PARTS FOR THE MINING INDUSTRY

S. Pakhomova<sup>1</sup>, R. Fakhurtdinov<sup>2</sup>, M. Ryzhova<sup>3</sup>

<sup>1, 2</sup> Ph.D., assistant Professor, e-mail: [vladisl-2013@yandex.ru](mailto:vladisl-2013@yandex.ru)

<sup>3</sup> senior Lecturer, e-mail: [mgtu2013@yandex.ru](mailto:mgtu2013@yandex.ru)

<sup>1, 2, 3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Materials Department, Russia

**Abstract.** The article includes the comparison of methods of gas carburizing that ensures the treatment quality basing on the analysis of the following process atmosphere parameters: carbon potential level, its controllability and mass-transfer coefficient. Vacuum carburizing is effective through a combination of rational processing atmosphere with the benefits of automated equipment.

The durability and reliability of the carburizing parts are crucial to the mining industry.

**Key words:** technological atmosphere, comparative analysis, methods of the carburizing: gas, vacuum, ionic.

**Введение.** Для обеспечения работоспособности основных деталей оборудования горнодобывающей промышленности, работающих в условиях высоких контактных напряжений и изнашивания, материал должен иметь повышенную прочность, структурную однородность и твердость [1].

Цементация самый востребованный процесс упрочнения нагруженных деталей машин – зубчатых колес горно-шахтного оборудования, карьерных самосвалов, очистных комбайнов, гусеничных машин, деталей подшипников высокоскоростного железнодорожного транспорта и многих других трущихся деталей.

Главная задача цементации – обеспечить заданную насыщенность диффузионного слоя углеродом, отвечающую высокому сопротивлению силам трения, контактным и циклическим нагрузкам, действующим в условиях эксплуатации. В результате цементация в сочетании с закалкой

должны определять уровень и качество упрочнения деталей. От этих операций зависит степень их деформации и, как следствие, трудоемкость последующей механической обработки. В этой связи цементация является важным звеном технологического процесса термического производства.

Значительные резервы повышения качества и снижения себестоимости упрочнения деталей машин связано с применением вакуумной цементации - нового способа цементации, использующего эффективную технологическую среду и автоматизированное оборудование. Преимущества новой технологии и степень изменения в термическом производстве следует из сравнительного анализа со способами газовой цементации, применяемыми на отечественных предприятиях.

### 1. Оценка способов газовой цементации

Цементация – сложный гетерогенный процесс, включающий образование в газовой среде активных атомов углерода, их доставку к поверхности металла, адсорбцию и диффузию. Протекание этих стадий характеризуется скоростью внешнего и внутреннего массопереноса углерода. Соотношение между этими скоростями определяется уравнением:

$$J = \beta (C_{\text{атм}} - C_{\text{пов}}) = -D \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right),$$

где:  $J$  - плотность потока углерода ( $\text{г}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ );  $C_{\text{атм}}$  - углеродный потенциал технологической атмосферы, характеризующий ее насыщающую способность;  $C_{\text{пов}}$  - концентрация углерода на насыщаемой поверхности;  $\beta$  - коэффициент массопереноса (скорости перехода) углерода из газовой среды на поверхность металла ( $\text{см}/\text{с}$ );  $D$  - коэффициент диффузии углерода ( $\text{см}^2/\text{с}$ );  $\frac{\partial C}{\partial x}$  - градиент концентрации углерода в поверхностном слое.

Левая часть равенства характеризует плотность потока углерода из газовой среды к поверхности насыщения; правая часть - плотность диффузионного потока углерода, который отводится от поверхности и формирует диффузионный слой.

Мерой интенсивности внешнего массопереноса служит коэффициент массопереноса  $\beta$ . Вместе с углеродным потенциалом коэффициент массопереноса является важной характеристикой технологической атмосферы и процесса науглероживания в целом. Чем активнее технологическая атмосфера - выше ее углеродный потенциал и выше коэффициент массопереноса, тем больше поступает углерода к единице поверхности металла, быстрее растет на ней его концентрация, интенсивнее идет процесс науглероживания.

Показатели  $C_{\text{атм}}$  и  $\beta$ , скорость и качество науглероживания, производственные расходы зависят от способа цементации, типа используемой технологической атмосферы, которых два:

- 1) атмосферы с контролируемым углеродным потенциалом;
- 2) атмосферы с контролируемым расходом технологического газа.

Атмосфера 1-го типа представляет собой искусственную газовую среду в виде эндотермической или экзо-эндогазовой атмосферы, содержащей: 20% CO + 40% H<sub>2</sub> + (CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) до 3% + остальное N<sub>2</sub> [1]. Атмосферу получают в специальных генераторах путем неполного сжигания природного газа. В такой атмосфере требуемая концентрация углерода на поверхности детали (обычно 0,8 %) задается ее углеродным потенциалом, к значению которого она приближается в конце процесса (рис.1).

Главное преимущество такой атмосферы – высокая стабильность получения заданных характеристик цементованного слоя. Такое свойство атмосферы предопределило ее применение в автоматизированных агрегатах непрерывного действия, используемых в условиях массового производства на предприятиях автомобильной промышленности [3].

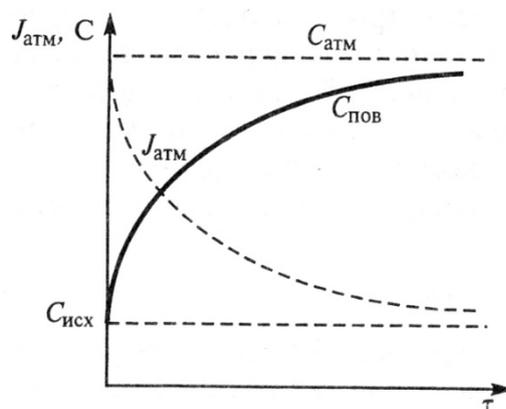
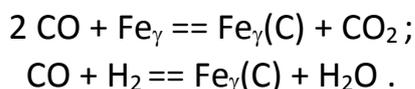


Рисунок 1 – Кинетика концентрации углерода на поверхности металла  $C_{пов}$  и плотности потока углерода  $J_{атм}$  при науглероживании в технологической атмосфере с регулируемым углеродным потенциалом  $C_{атм}$

Основной науглероживающий компонент атмосферы - оксид углерода, концентрация которого определяет углеродный потенциал. На поверхности детали идут реакции разложения CO:



Углеродный потенциал атмосферы измеряют и регулируют косвенно – по содержанию в составе газа одного из его компонентов: CO<sub>2</sub> или H<sub>2</sub>O, а в последнее время по концентрации кислорода.

Контролируемой атмосфере присущи существенные недостатки.

1. Невысокая скорость науглероживания. Она обусловлена физико-химическим механизмом перехода углерода из газовой среды на поверхность металла.

Реакции разложения CO тормозятся образованием на поверхности адсорбционного слоя из молекул CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O. Этот слой затрудняет каталитическое действие поверхности и разложение CO, обуславливая низкие значения коэффициента массопереноса углерода ( $\beta = (45...60) \cdot 10^{-5}$  см/с [2]) и, как следствие, невысокую скорость роста цементованного слоя (0,10...0,15) мм/ч, большое (10...12 ч) время науглероживания для формирования слоя толщиной (1,0...1,2) мм.

2. Процесс цементации надежно контролируется только при науглероживании твердого раствора - аустенита. Образование в нем выделений карбидов нарушает равновесие атмосферы с поверхностью металла (карбиды не разлагают молекул CO). По этой причине величина углеродного потенциала атмосферы не должна превышать предела растворимости углерода в аустените (обычно не более 1,2 % C). Контролируемая атмосфера, таким образом, *пригодна* только для науглероживания низколегированных сталей (18ХГТ, 20ХГМ, 20ХНМ и др.) и *не пригодна* для цементации комплексно-легированных сталей, цементованный слой которых должен иметь значительную долю карбидной фазы.

3. Низкий (15...25 %) коэффициент полезного использования углерода газовой среды; большая его часть выбрасывается в атмосферу.

4. Наличие окисляющих компонентов (CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O), способных вызывать внутреннее окисление легирующих элементов, образование включений оксидов.

5. Отсутствие технологической гибкости; переход на другой режим обработки требует длительного времени и, как правило, не практикуется.

Атмосфера 2-го типа характерна для способа газовой цементации в шахтных печах [3]. Рабочую атмосферу создают непосредственно в рабочем пространстве печи в результате пиролиза жидкого карбюризатора (синтина, пиробензола и др.). Преимущественно используется синтин. При его разложении образуется атмосфера, содержащая: (20...25) % CO + (20...25) % CH<sub>4</sub> + 40 % H<sub>2</sub> + (0,1...0,3) % CO<sub>2</sub> + остальное N<sub>2</sub>. Такая атмосфера из-за высоких значений CH<sub>4</sub> обладает высокой науглероживающей способностью. Однако вследствие малых количеств окисляющих компонент CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O контролировать углеродный потенциал становится невозможным, равновесие смещено в сторону выделения углерода. Величина углеродного потенциала превышает предел растворимости углерода в аустените. Это дает возможность обрабатывать различные стали, создавать на поверхности повышенную (2,0 % и более) концентрацию углерода.

Регулировать насыщающую способность приходится изменением расхода подаваемого карбюризатора. Количественные показатели технологической атмосферы 2-го типа несколько выше: коэффициент перехода

углерода  $\beta = (60...80) \cdot 10^{-5}$  см/с, средняя скорость роста цементованного слоя (0,15...0,25) мм/ч, продолжительность науглероживания на слой толщиной (1,0...1,2) мм составляет (8...10) ч.

Вместе с тем, рассматриваемый способ цементации имеет невысокие оценочные характеристики по качеству и стабильности науглероживания.

Рост концентрации углерода на поверхности не имеет четного предела. Поверхностная концентрация растет по мере увеличения времени науглероживания, которое нужно останавливать на заданной насыщенности, что точно выполнить затруднительно. Процесс необходимо регулировать в кинетическом режиме, изменяя подачу карбюризатора. Другая причина нестабильности состоит в том, что результат науглероживания зависит от площади поверхности обрабатываемых деталей, точное определение которой затруднено.

Указанные трудности усиливают конструктивные недостатки шахтных печей: нестабильная работа капельниц, слабая циркуляция атмосферы, отсутствие автоматизации. Науглероженные нагретые детали охлаждаются на воздухе, что вызывает развитие процессов окисления и обезуглероживания, приводящие к снижению циклической прочности [4].

Совокупность причин приводит к тому, что в производственных условиях наблюдаются значительные колебания концентрации углерода (от 0,5 до 1,3 %) на поверхности деталей, обработанных по одинаковому режиму.

Комплекс недостатков, присущих применяемым способам газовой цементации, указывает на необходимость использования новых высокоэффективных технологий.

## 2. Показатели эффективности вакуумной цементации

Вакуумная цементация - цементация при низком (4...15 ГПа) давлении с использованием в качестве газовой среды ацетилена -  $C_2H_2$ . Ацетилен подают циклически в виде чередования стадий – активных, когда в камеру подают ацетилен, и пассивных (диффузионных) стадий, которые проводят в вакууме.

Технологическая атмосфера из ацетилена, признана [5] идеальной средой для науглероживания. В этой среде процессы массопереноса углерода происходят самым эффективным образом. Особенность ацетилена – способность его молекул адсорбироваться на активных центрах насыщаемой поверхности и каталитически диссоциировать ( $C_2H_2 \rightarrow 2[C] + H_2$ ). Атомы железа, расположенные на поверхности детали, имеют ненасыщенные связи и способны устанавливать вначале физические связи с молекулами ацетилена, а затем и химические связи с продуктами диссоциации ацетилена.

В виде схемы процессы развиваются следующим образом (рис. 2) [5]:

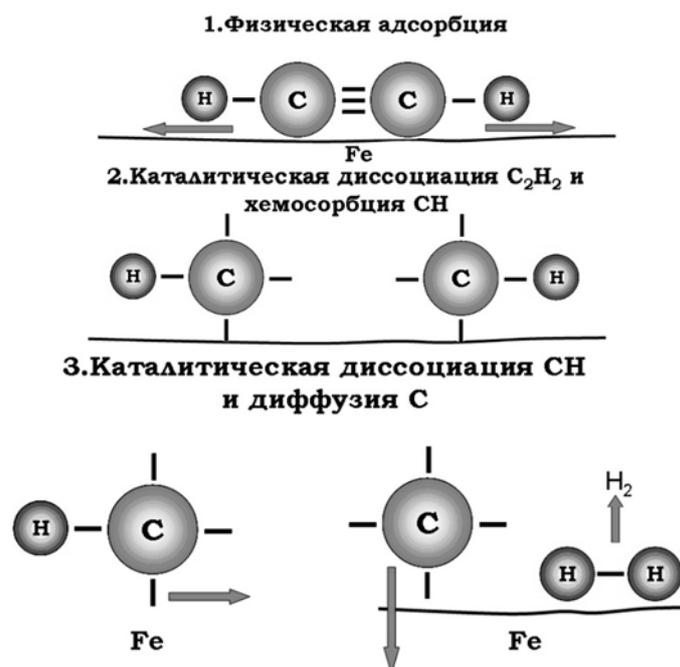
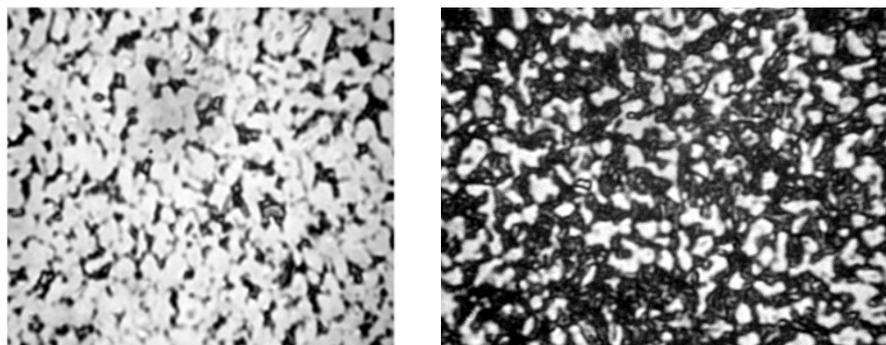


Рисунок 2 – Схема взаимодействия молекулы ацетилена с поверхностью железа

Поверхность полностью и практически мгновенно заполняется атомами углерода. Их количество уже в первые минуты науглероживания оказывается достаточным для образования на поверхности сталей почти сплошного углеродсодержащего слоя в виде сажистого (аморфного) углерода или карбидов. Углеродный потенциал достигает для низколегированных сталей 100 %, а коэффициент массопереноса  $\beta$  – рекордных значений: 350...450 см/с.

Интенсивный перенос углерода создает на поверхности высокий градиент концентрации и, как следствие, обеспечивает высокий диффузионный поток  $J = D \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)$ , что ускоряет формирование слоя. Время для образования слоя толщиной (1,0...1,2) мм составляет 5...6 ч, что в 1,5...2 раза меньше, чем при обычных способах газовой цементации.

Эффективность вакуумной цементации особенно наглядно проявляется при науглероживании теплостойких сталей (20Х3МВФА, 16Х3НВФМБ, 10Х3НЗМ2ВФБ-Ш и др.). Высокое содержание в них карбидообразующих элементов (близкое к 6 %) приводит к тому, что на активной стадии цикла поверхность, в первые минуты науглероживания, практически полностью покрывается тонким слоем карбидной фазы (белое поле на рис. 3, а). На пассивной стадии значительная часть карбидов (легированный цементит) растворяется, поставляя атомы углерода в твердый раствор (рис. 3, б).



а) x1600

б) x1600

Рисунок 3 – Микроструктура поверхности теплостойкой стали после вакуумной цементации при температуре 940 °С: а) время активной стадии 5 мин; б) время активной стадии 5 мин + время пассивной (диффузионной) стадии 10 мин

Таким образом, цементованный слой формируется путем частичного растворения слоя карбидов на пассивной стадии цикла и его возобновления на активной стадии цикла. Углеродный потенциал газовой среды устанавливается постоянным и высоким, соответствующим содержанию углерода в карбидах цементитного типа (6,7 %).

Между тем поверхность карбидов вследствие насыщенности валентных связей не обладает каталитической активностью, поэтому не вызывает диссоциации молекул ацетилена. Углерод перестает поступать к той части поверхности, которая закрыта карбидной фазой. В результате перенос углерода из газовой среды к насыщаемой поверхности осуществляется в режиме саморегулирования. На стадии насыщения к поверхности поступает столько углерода, сколько необходимо для покрытия ее карбидной фазой.

Режим саморегулирования исключает необходимость управления углеродным потенциалом газовой среды, упрощает проведение процесса и создает условия высокой повторяемости результатов обработки.

Для вакуумной цементации также свойственно:

- возможность гибкого управления процессом путем изменения режима циклической подачи ацетилена;
- сокращение длительности насыщения в 1,5...2 раза;
- высокая эффективность использования подаваемой в камеру газовой среды (до 75 %, вместо 20 % при обычной газовой цементации);
- уменьшение расхода электроэнергии (до 80 %);
- отсутствие внешнего и внутреннего окисления из-за насыщения в бескислородной атмосфере;
- экологическая чистота.

Отмеченные преимущества указывают на то, что вакуумная цементация отвечает требованиям интенсивной и энергосберегающей технологии.

**Вывод.**

1. На основе критериев количественной оценки эффективности технологического процесса диффузионного насыщения выполнен анализ применяемых технологических атмосфер и способов цементации. Показано, что при вакуумной цементации газовая среда наиболее полно отвечает требованиям, предъявляемым к технологическим атмосферам. Она обладает высокой насыщающей способностью, значительно сокращает время обработки, требует ничтожно малого расхода углерода, что в совокупности обуславливает заметную эффективность процесса.

2. Установлено, что при вакуумной цементации процесс диффузионного насыщения идет в режиме саморегулирования и не требует контроля углеродного потенциала. Такая особенность создает условия хорошей повторяемости результатов обработки, что имеет решающее значение при проведении процесса в производственных условиях горно-добывающей промышленности.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Металловедение. Термическая и химико-термическая обработка сплавов* : сб. науч. тр. / ред. Арзамасов Б. Н. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. - 245 с.

2 Кантор С.И., Черняховский Е.З., Потапова С.С. Определение коэффициента массопереноса углерода при газовой цементации // Труды ВНИПИ. Теплопроект, М., 1974. - № 34. – С.44 -53.

3. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 303 с.

4. Мордовин А.И., Фомина Л.П., Смирнов А.Е. и др. Анализ эффективности газовых сред при вакуумной цементации // Упрочняющие технологии и покрытия, 2008. - № 11. - С.31-35.

5. Atena H., Schrank F. Neiderdruck – Aufkohlung mit Hochdruck - Gasabsschreckung // НМТ. - 2002. - V. 4. - № 57. - P. 247-256.

УДК 53.008:519.855:004.94:621.8

**АЛГОРИТМ ИМИТАЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ  
ЗУБЬЕВ И ЕГО ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ В NI LABVIEW**

**П.А. Ружин<sup>1</sup>, В.А. Дербаб<sup>2</sup>, С.Т. Пацера<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Магистрант группы ТМА-15, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: [pavelrujtavr@gmail.com](mailto:pavelrujtavr@gmail.com)

<sup>2</sup>Кандидат технических наук, доцент кафедры технологии горного машиностроения, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: [5762634@gmail.com](mailto:5762634@gmail.com)