



Рис. 4. Микроструктура титанированной проволоки,  $\times 50$

Высокое качество поверхности проволоки, обусловленное применением внутреннего источника нагрева, позволяет применять ее в качестве наносимого материала, как при наплавке, так и при напылении защитного покрытия. Еще одним перспективным направлением является модифицирование расплавов. Наиболее удобным и технически легко осуществимым способом модифицирования является ввод в расплав тонкоизмельченных модифицирующих присадок, помещенных в металлических трубках (полый проволоки).

Однако такая проволока отличается повышенной стоимостью, и ее применение требует предварительных экономических расчетов. Экономно-легированная проволока подается в металл с регулируемой скоростью, обеспечивая высокую степень усвоения модификатора, не повышая столь значительно стоимость самого процесса модифицирования.

**Заключение.** Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- электрохимико-термическая обработка, реализуемая путем совмещения электроконтактного нагрева и термоциклирования, осуществляемого по маятниковой схеме - наиболее эффективный способ интенсификации процесса диффузионного насыщения проволоки.
- электрохимико-термическая обработка позволяет получить относительно недорогую проволоку по сравнению с легированной проволокой и за значительно меньший период времени по сравнению с традиционным насыщением в печи.
- наиболее предпочтительной является непрерывная подача проволоки в зону диффузионного насыщения. В этом случае про-

лока прогревается равномерно по всей длине, что способствует формированию более равномерного диффузионного слоя;

- полученная экономно-легированная проволока отличается высоким качеством поверхности, низким градиентом концентрации легирующего элемента поперечному сечению, повышенной пластичностью.
- область применения получаемой экономно-легированной проволоки является нанесение защитных покрытий и модифицирование расплавов. Конечно, область применения проволоки этим не ограничивается и может быть значительно расширена.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пантелеенко, Ф.И. О классификации способов интенсификации процессов химико-термической обработки металлов и сплавов. / Ф.И. Пантелеенко, Л.С. Ляхович, Б.С. Кухарев // *Металлургия*, 1980 - Вып. 14. - С. 5-6.
2. Ворошнин, Л.Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М.Константинов. - Минск: ФТИ Новополоцк: ПГУ, 1999. - 133 с.
3. Мешков, Ю.Я. Скоростная электротермическая обработка проволоки / Ю.Я.Мешков, Н.Ф.Черненко // *МитОМ*, 1977. - №8. - С. 36-38.
4. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов / Под ред. М.Х.Шорошова. - М.: Наука, 1984. - 187 с.
5. Федюкин, В.К., Смагоринский, М.Е. Термоциклическая обработка металла и деталей машин / В.К.Федюкин, М.Е. Смагоринский. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1989. - 255 с.
6. Способ диффузионного насыщения стальных образцов, преимущественно проволоки: С23С8 00 / В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» -№ а 20080742 от 05.06.2008.
7. Установка для электротермической обработки проволоки: Патент на полезную модель № 696 МПК 7 С21D 1/40 - В.М. Константинов, А.С. Губанов, С.Н. Абраменко, М.В. Семенченко; заявитель УО «Полоц. гос. ун-т» № и 20020065; заявл. 05.03.02., Опубл. 30.12.02.
8. Константинов, В.М. Электрохимико-термическое насыщение стальной проволоки для защитных покрытий В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов // *Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию ФТИ.* - Мн., 2006 - С. 428-434.
9. Семенченко, М.В. Электрохимико-термическая проволока для наплавки как перспективный способ получения диффузионно-легированной проволоки для защитных покрытий. М.В. Семенченко // *Сборник научных трудов VI международной научно-технической конференции «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» - Новополоцк, 2007.* - Т. 1. - С. 132-134.

*Материал поступил в редакцию 15.10.08*

KONSTANTINOV V.M., SEMENCHENKO M.V. Electrical chemical-thermal processing as the way of reception is economical-alloyed of a wire

The way of reception steel economically-alloyed of wire and installation for his realization is offered. The way is based on overlapping of electrocontact heating and thermalcycle's, carried out on pendulum's the circuit. The distinctive features of the received economically-alloyed wire are shown. The area of application is designated: drawing of sheetings, modifying the fused metal.

УДК 620.197.5

**Голуб В.М., Голуб М.В., Добрияник Ю.А.**

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ КАРБИДОВ ВОЛЬФРАМА С МЕДЬСОДЕРЖАЩЕЙ МАТРИЦЕЙ

**Введение.** Работа торцовых уплотнений валов гидромашин характеризуется режимом трения основного его элемента – пары трения в виде двух контактных колец, смазка которой осуществляется

перекачиваемой средой, часто не отвечающей условиям работы узлов трения.

В перекачиваемой по магистральным трубопроводам нефти ча-

*Голуб Владимир Михайлович, к.т.н., доцент кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета.*

*Голуб Михаил Владимирович, д.т.н., профессор кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета.*

*Добрияник Юрий Алексеевич, преподаватель-стажер кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224023, г. Брест, ул. Московская, 267.*

сто содержатся пластовая, сильно минерализованная вода, сераорганические и хлорорганические соединения, растворенные в различных количествах отсутствующие газы (сероводород, меркаптаны, углекислый газ, азот).

Содержание серы в нефти различно и колеблется в пределах от 0,03 до 5,5 %. Содержание кислорода и азота в среднем 0,5...1,8 %. Большое количество азотистых соединений свойственно сернистой нефти. Присутствие кислорода в нефти связано с наличием в ней кислородных соединений: нафтеновых кислот, фенолов, смолистых и асфальто-смолистых веществ.

Сероводород и меркаптаны, обладающие кислотными свойствами, а также элементарная сера образуют группу активных серосодержащих соединений, вызывающих наиболее сильную коррозию оборудования и трубопроводов. Наличие ионов хлора в растворах значительно влияет на скорость коррозии металлов.

Важно знать степень и скорость коррозии контактного пояса колец пар трения, поскольку нарушение геометрии контактных поверхностей приводит к интенсивным утечкам и отказам уплотнений. Так как коррозией в результате агрессивности перекачиваемой среды разрушается, в основном, матричная связка, поэтому важным является подбор ее состава.

**1. Общие подходы защиты металлов от коррозии.** Результатом коррозионного процесса является переход атомов металла из металлической решетки в ионное состояние, т.е. образование растворимых, типа окиси, гидроокиси или более сложных комплексных соединений металлов. В зависимости от пути, по которому совершается этот переход, различают два основных возможных механизма коррозионного процесса: химический и электрохимический [1,2].

Под химической коррозией подразумевают взаимодействие металлической поверхности с окружающей средой по механизму химических реакций, когда атом металла непосредственно реагирует с молекулой реагента. Примером химической коррозии является взаимодействие металла с жидкими неэлектропроводными средами или сухими газами.

Электрохимическая коррозия – разрушение металлов под воздействием электролита. Электрохимическая коррозия является наиболее распространенным видом коррозии металлических конструкций и оборудования в природных условиях.

Основное отличие электрохимического механизма от чисто химического заключается в том, что взаимодействие реагента с металлом при электрохимическом процессе разделяется на два самостоятельных, но сопряженных в общей цепи – анодный и катодный. Анодный процесс – это непосредственный переход атомов металла в раствор в виде гидротированных ионов за счет взаимодействия с молекулами воды или комплексно-образующими ионами электролита. При этом валентные электроны атома металла непосредственно не участвуют в анодном процессе. В отличие от анодного, в катодном процессе происходит ассимиляция остающихся в металле избыточных электронов атомами, молекулами или ионами раствора, которые будут в результате этого восстанавливаться.

Установив характер кинетики основных стадий коррозионного процесса в данных условиях, можно обоснованно выбрать наиболее рациональные и эффективные для данного случая методы борьбы с коррозией.

Существует много разнообразных методов борьбы с электрохимической коррозией [1], которые включают: применение защитных покрытий на органической и неорганической основе; металлические покрытия; обработка коррозионной среды, понижающая ее коррозионную активность; электрохимическая защита, основанная на катодной поляризации наложением внешнего тока или применением протекторов; применение конструктивных металлических материалов повышенной коррозионной стойкости; рациональное конструирование и эксплуатация металлических сооружений и деталей. Наиболее эффективным методом защиты металлов от коррозии обычно является тот, который преимущественно тормозит основную контролируемую стадию данного электрохимического коррозионного процесса.

Одним из надежных способов защиты от коррозии является метод, основанный на переходе металлов или сплавов, в условиях

взаимодействия с агрессивной средой, в пассивное состояние (пассивация). Определение пассивности, базирующееся на электрохимическом механизме этого явления, следующее [4]. Пассивность понимается как состояние повышенной стойкости металлов или сплава, вызванное преимущественным торможением коррозионного процесса анодного растворения металла, с образованием на поверхности металла адсорбционных, а в некоторых случаях и более утолщенных слоев, чаще окисной или гидроокисной природы. Отмечено, что наиболее склонны к явлению пассивности переходные металлы, имеющие незаполненный электронный d-уровень, такие как хром, железо, кобальт, никель и др. [4].

Явление пассивности металлов и сплавов позволяет достичь оптимальным легированием значительной коррозионной стойкости сплавов в различных агрессивных средах. Однако сложность явлений, обуславливающих повышенную коррозионную стойкость металлического сплава в активных средах, не позволяют обосновать научную теорию коррозионностойкого легирования, способную объяснить и предугадать характер коррозионного поведения различных сплавов в разнообразных условиях их применения.

Следует отметить, что не существует единого подхода к созданию коррозионностойких сплавов, как и не существует единого металлического сплава, устойчивого против коррозионного воздействия в любых средах. Оценка коррозионной стойкости сплавов в каждом конкретном случае может быть получена только экспериментальным путем.

**2. Исследования коррозионной стойкости композиционных материалов.** Композиционные материалы получили применение при изготовлении контактных колец пар трения торцовых уплотнений валов и осевых опор скольжения нефтяных и водяных центробежных насосов.

Специфика работы пары трения торцового уплотнения, взаимодействующего с окружающей средой, когда в условиях трения контактных поверхностей происходит износ и образование новых структурных пленок на контакте еще более усложняет протекающие в нем механохимические процессы в связи с агрессивным действием перекачиваемой среды.

Композиционный материал колец пары трения имеет каркасную основу, состоящую из карбида вольфрама, пропитанного медьсодержащим матричным сплавом, обеспечивающим некоторые специальные свойства всего материала: антифрикционность, теплопроводность, износостойкость. Сам карбид вольфрама стоек к действиям агрессивных жидкостей, поэтому для оценки коррозионной стойкости композита, с целью упрощения экспериментов, можно ограничиваться испытаниями материалов связующей фазы.

Из многообразия способов оценки коррозионной стойкости материалов и сплавов наиболее распространенным и простым в аппаратурном оснащении является весовой метод.

Он позволяет в первом приближении оценить коррозионную стойкость сплава, характер его коррозии. Скорость коррозии по этому методу определяется по формуле:

$$K = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot t}, \quad (1)$$

где  $K$  – коррозионная стойкость, г/м<sup>2</sup>·ч;

$m_0$  – первоначальная масса образца, г;

$m_1$  – масса образца после испытания, г;

$S$  – поверхность образца в метрах квадратных;

$t$  – время испытания, ч.

При определении этого показателя важно тщательно удалить продукты коррозии. В некоторых случаях, когда продукты коррозии не удаляются с поверхности образца, скорость коррозии определяется по увеличению массы. Для удобства, коррозию лучше всего выражать в толщине разрушенного металла или сплава, которую называют проникаемостью и измеряют в мм/год или мкм/год. Пересчет потерь массы металла на проникаемость выполняется по формуле:

$$\rho = \frac{K}{r}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность металла или сплава.

Порядок проведения опыта включает: подготовку образцов, обмер образцов, взвешивание образцов, подготовка растворов активных сред, испытания образцов в активной среде, установленное методикой время, изъятие образцов из активной среды, очистка образца, от продуктов коррозии, сушка образца; взвешивание образцов, расчет скорости коррозии и проницаемости по формулам (1) и (2).

Для исследования коррозионной стойкости были выбраны следующие составы пропиточных сплавов (таблица 1).

В качестве агрессивных сред приняты следующие растворы: раствор 36-38% HCl и раствор 98% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. В качестве щелочной среды был выбран раствор едкого натра 1N NaOH. Время испытаний – 100 часов, а температура 20°С. Результаты испытаний сведены в таблицу 2, из которых видно, что наибольшее коррозионное воздействие на указанные сплавы оказывает соляная кислота. Так, скорость коррозии сплава ВПр – 4 в HCl составляет 3,689 г/м<sup>2</sup>·час, а сплав 3 – 4,797 г/м<sup>2</sup>·час. На сплав ЛМНЦ–60-9-5 и сплавы 1 и 2 соляная кислота действует менее агрессивно. Их скорости коррозии соответственно составляют: 1,027 г/м<sup>2</sup>·час; 0,57 г/м<sup>2</sup>·час; 1,08 г/м<sup>2</sup>·час. Концентрированная серная кислота слабо взаимодействует почти со всеми сплавами. Наибольшую коррозионную стойкость данные сплавы имеют по отношению к щелочи NaOH, где скорость коррозии колеблется от 0,0025 (ЛМНЦ–60-9-5) до 0,116 (сплав 3).

**Заключение.** Представленные экспериментальные исследования показывают, что для обеспечения высокой надежности и долговечности контактные пары трения уплотнений должны изготавливаться из материала, обладающего высокими триботехническими

характеристиками, износостойкостью, теплопроводностью и коррозионной стойкостью. Наиболее полное сочетание таких свойств обеспечивает композиционный материал, состоящий из твердых частиц, образующих жесткий каркас, и пластичной связующей фазы, обеспечивающей теплоотвод и антифрикционные свойства. Для получения высокой износостойкости целесообразно использовать твердые частицы разного размера, что приводит к снижению пористости и образованию плотного каркаса твердой фазы.

В качестве твердой фазы предлагается применять смесь: карбид вольфрама (релит) WC+W<sub>2</sub>C зернистостью 0,18-0,25 мкм (содержание в смеси 70%) и порошок твердого сплава ВК6 зернистостью 4-10 мкм (содержание 30% в смеси), а в качестве связующей фазы – сплав 90% Cu + 10% Ni, обеспечивающий высокие триботехнические характеристики, теплоотвод, коррозионную стойкость и имеющий невысокую температуру плавления.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Защита нефтепромыслового оборудования от коррозии. Учебное пособие. / Гутман Э.М., Низамов К.Р., Гетманский М.Д. – М.: Недра, 1983. – 152 с.
2. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. Учебник для вузов. / Кузнецов М.В., Новоселов В.Ф., Тугунов П.И., Котов В.Ф. – М.: Недра, 1992. – 238 с.
3. Современные системы защиты от электрохимической коррозии подземных коммуникаций. / Рахманкулов Д.Л., Кузнецов М.В., Габитов А.И., Зенцов В.Н., Кузнецов А.М. – Уфа, изд-во «Реактив», 1999. – 234 с.
4. Томашов Н.Д., Черняев Г.П. Коррозия и коррозионно-стойкие сплавы. – М.: Металлургия, 1973.

Материал поступил в редакцию 16.09.08

Таблица 1. Составы связующей фазы композиционного материала, исследуемые на коррозионную стойкость

Обозначение	Содержание составляющих элементов, %
Сплав 1	Cu – 90%, Ni – 10%
Сплав 2	Ni – 32,39%, Mn – 7,32%, B – 0,3 %, Si – 0,39%, остальное – Cu
Сплав 3	Ni – 13,04%, Mn – 11,78%, B – 0,32 %, Si – 0,65%, остальное – Cu
Припой ВПр – 4	Mn – 27-30%, Ni – 28-30%, Si – 0,8-1,2%, Fe – 1,0-1,5%, Li – 0,15-0,3%, B – 0,15-0,25%, Co – 4-6%, K – 0,01-0,2%, Na – 0,05-0,15%, P – 0,1-0,2%, остальное – Cu
Припой ЛМНЦ–60-9-5	Cu – 59-61%, Ni – 8-10%, Mn – 4-6%, B – 0,03-0,1%, остальное – Zn

Таблица 2. Результаты испытаний связующей фазы на коррозионную стойкость

Наименование испытуемого материала	Коррозионная среда	Описание коррозионного поражения	Скорость коррозии, К г/м <sup>2</sup> ·час	Плотность сплава, г/см <sup>3</sup>	Проницаемость П мм/год
Сплав 1	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (98%)	Коррозия носит равномерный характер, заметных коррозионных пятен нет	0,07	8,9	0,07
	HCl (38%)	Равномерная коррозия по всей поверхности без видимых очагов. Поверхность стала матовой	0,57	8,9	0,532
	NaOH (1N)	Видимых изменений нет	0,0076	8,9	0,0075
ЛМНЦ–60-9-5	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (98%)	Коррозия равномерная по всей поверхности без очагов	0,02	8,33	0,02
	HCl (38%)	Матовая поверхность образца, коррозия равномерная	1,0275	8,33	1,08
	NaOH (1N)	Видимых изменений нет	0,0026	8,33	0,0026
ВПр – 4	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (98%)	Равномерная коррозия	0,016	8,043	0,01
	HCl (38%)	Коррозия носит равномерный характер, имеются отложения продуктов коррозии	3,369	8,043	4,01
	NaOH (1N)	Видимых изменений нет	0,019	8,043	0,02
Сплав 2	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (98%)	Видимых поражений не обнаружено	0,09	8,642	0,09
	HCl (38%)	Образец полурастворился, потерял устойчивость и форму	1,08	8,642	1,09
	NaOH (1N)	Изменений нет	0,077	8,642	0,07
Сплав 3	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (98%)	Коррозия равномерна	0,129	8,476	0,183
	HCl (38%)	Образец полностью растворился за 70 часов	4,797	8,476	4,95
	NaOH (1N)	Видимых изменений нет	0,116	8,476	0,119

The operation of face seals of hydraulic machine shafts is characterized by the friction mode of its main element – a friction pair of two contact rings, lubrication of which is carried out by the pumping medium which often does not meet the operating requirements for friction joints.

Hydrogen sulphide and mercaptans, both possessing acid properties, as well as elementary sulphur are known to form a group of active sulphur-containing compounds, which cause a most pronounced corrosion of machines and pipelines. Corrosion, resulting from the aggressive pumping medium, is known to primarily destroy the matrix binder, which makes the choice of its composition very important. The researches we have carried out make it possible to propose the following mixture for the solid phase: tungsten carbide WC + W<sub>2</sub>C of 0,18-0,25 mkm graininess (70% in the mix) and the powder of hard alloy BK6 of 4-10 mkm graininess (30% in the mix); and 90% Cu + 10% Ni alloy as a binding phase, which ensures high tribotechnical characteristics, as well as heat abstraction and corrosion resistance.

УДК 621.91-529:62-19

**Горбунов В.П., Григорьев В.Ф., Рудюк А.Н.**

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА С ЧПУ

**Введение.** При обработке прецизионных корпусных деталей на многоцелевых станках существенную долю в балансе погрешностей занимают погрешности, вызываемые тепловыми деформациями несущей системы, приводящие к изменению относительного положения заготовки и инструмента. Данные изменения обуславливают искажение исходной траектории движения рабочего органа, что важно при контурной обработке, а также изменение точности координатных установочных перемещений при позиционной обработке. Происходит снижение параметров качества обрабатываемых деталей, как точность линейных и угловых размеров, точность взаимного расположения поверхностей и осей, точность формы и др., что значительно сокращает резерв точности технологической системы.

Следует учитывать, что тепловые деформации и обусловленные ими повреждения не ограничиваются только деформационными перемещениями узлов и деталей станка. С изменением температуры изменяется, например, вязкость масла – рабочей жидкости гидропривода, который обеспечивает формообразующие движения в станке, что приводит к нарушению точности позиционирования, скорости перемещений, снижению виброустойчивости. Теоретически предсказать все тепловые повреждения и рассчитать нарушения точности от их суммарного влияния – задача трудновыполнимая. Это объясняется особенностями теплообмена между деталями сложной конфигурации, нестабильностью мощности тепловыделения различных одновременно действующих тепловых источников, разнообразием условий эксплуатации станка, параметров обрабатываемых деталей, случайным характером процессов высокой и средней скорости, определяющих тепловой режим работы оборудования [3].

**1. Постановка задачи.** Исходя из условий формирования погрешностей обработки, элементы станка вследствие их влияния на возникновение тепловых деформаций можно разбить на две группы [4].

1. Группа механизмов, оказывающая существенное влияние на отклонения формы и расположения деталей. Как правило, это элементы, обладающие малой тепловой инерцией. Во время обработки механизм быстро нагревается и деформируется, во время перестановки детали он успевает остыть, но не возвращается в начальное состояние. К данной группе относится шпиндельный узел станка.
2. Группа элементов станка, которые имеют большую тепловую инерцию, медленно нагреваются, но и медленно охлаждаются. Оказывают влияние в основном на отклонение размера. Как правило, это механизмы, непрерывно работающие в станке (гидро-

станции), либо расположенные в массивных частях оборудования – станках (стойках). В станках это коробки скоростей и подачи.

Образование погрешностей обработки от механизмов первой группы связано с изменением взаимного положения детали и инструмента. К концу обработки первой заготовки они достигают определенного значения. За это же время от тепловых деформаций образуется отклонение формы. Однако процесс тепловых деформаций обратим и за то время, пока производится перестановка следующей обрабатываемой заготовки, система частично остывает, но остаются погрешности. Это есть погрешность размера для второй детали. На станке после установки новой заготовки вновь начинают обработку. Отклонение расположения (например, параллельность или перпендикулярность оси отверстия к базовой плоскости корпусной детали) для второй детали будет увеличиваться, а отклонение формы (например, отклонение от цилиндричности поверхности отверстия) останется неизменным. В ходе непрерывного циклического процесса нагрев - охлаждение увеличение погрешностей будет продолжаться до стабилизации температуры нагрева рассматриваемого узла станка.

Влияние второй группы элементов станка имеет меньшую интенсивность, и за время обработки одной детали не оказывают существенного значения на отклонение формы и расположения, однако на отклонение размера (например, позиционное отклонение) она все же оказывает определенное влияние. Зависимость изменения взаимного положения формообразующих узлов от времени, как показывают эксперименты [1], носит экспоненциальный характер. Перерывы в работе станка не вызывают заметного изменения ее формы.

Суммарные тепловые деформации в прецизионных станках являются одной из главных причин отклонения действительной траектории формообразующего движения от заданной. Компенсация их в реальном масштабе времени требует непрерывного учета тепловой ошибки в процессе обработки деталей. В равной степени это также относится к точности позиционной обработки, когда формирование размера определяется точностью координатных установочных перемещений рабочих органов станка с ЧПУ в запрограммированное положение.

Тепловые деформации (перемещения) формообразующих элементов станка можно измерить, когда это доступно, прямыми методами с помощью датчиков перемещения. Однако это не всегда возможно в процессе эксплуатации станка. В случае невозможности произвести непрерывное измерение прямыми методами, вследствие отсутствия доступа к повреждениям во время работы, применяют косвенные методы. Так, косвенным диагностическим признаком

*Горбунов Виктор Петрович, к.т.н., доцент кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета.*

*Григорьев Владимир Федорович, к.т.н., доцент кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета.*

*Рудюк Александр Николаевич, магистрант кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224023, г. Брест, ул. Московская, 267.*