



УДК 621.787

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Л.В. ФЕДОРОВА<sup>1</sup>, Ю.С. ИВАНОВА<sup>1</sup>, М.В. ВОРОНИНА<sup>2</sup><sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Представлены технологические схемы электромеханической обработки (ЭМО) с исследованием особенностей формирования высокопрочных структур сталей в области термомеханического высококонцентрированного воздействия на поверхностный слой впадины и боковые участки наружной и внутренней резьбы. Приведены результаты апробации применения технологических процессов электромеханической обработки. Материалы статьи представляют практическую ценность для специалистов различных областей, занимающихся вопросами повышения надежности резьбовых соединений.

**Ключевые слова:** износостойкость, резьба, поверхностный слой, электромеханическая обработка, микротвердость, усталостная прочность, резьба буровых штанг, резьба насосно-компрессорных труб

**Как цитировать эту статью:** Федорова Л.В. Повышение надежности резьбовых соединений электромеханической обработкой / Л.В.Федорова, Ю.С.Иванова, М.В.Воронина // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 456-461. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.456

**Введение.** Повышение качества резьбы бурильных и буровых труб, переводников и переходников, насосно-компрессорных и обсадных труб, корпусов электропогружных насосов, широкой номенклатуры метизных изделий является актуальной задачей. Низкое качество резьбы вышеперечисленных деталей связано с особенностями конструкции, технологическими сложностями при ее изготовлении и восстановлении, схемой нагружения и условиями эксплуатации резьбовых соединений.

Основным способом формирования геометрических параметров наружной и внутренней резьбы для деталей нефтепромыслового и горного оборудования является резбонарезание. Нарезание резьбы производится по профильной или генераторной схеме резьбовыми резцами или пластинками из твердого сплава. Широкое распространение получили методы нарезания резьбы специальными гребенками, особенно на станках с ЧПУ. Наружная и внутренняя резьба после резбонарезания по геометрическим параметрам соответствуют требованиям стандартов, контролируются предельными калибрами и обеспечивают свинчиваемость. Проблем с обеспечением точности резьбы на стадии изготовления новых деталей или при восстановлении изношенных изделий не отмечается.

Для повышения надежности резьбовых соединений необходимо соблюдение ряда требований: высокая износостойкость и прочность витков резьбы, усталостная долговечность витков и стержня резьбы; высокая твердость поверхностного слоя с сохранением вязкой сердцевины витков; оптимальная высота и форма микронеровностей поверхностного слоя; мелкодисперсная структура поверхностного слоя; благоприятная (радиусная) форма основания резьбы; оптимальное расположение волокон металла; сжимающие остаточные напряжения во впадине; защита резьбы от коррозии и водородной хрупкости; ремонтпригодность и сохранность.

Существующие способы упрочнения и повышения функциональных свойств резьбы стальных деталей связаны с применением методов поверхностного пластического деформирования (ППД), термической, химико-термической, лазерной, магнитно-импульсной, термомеханической и комбинированных методов повышения надежности.

Применение методов ППД (обкатывание впадины роликами, дробеструйная обработка, ультразвуковая обработка) позволяет повысить усталостную долговечность деталей с резьбой. Формируя оптимальную шероховатость, текстуру волокон металла, сжимающие остаточные напряжения во впадине резьбы и повышая твердость поверхностного слоя, методы ППД не обеспечивают существенного повышения износостойкости и прочности витков резьбы.

Среди термических методов повышения износостойкости и прочности наибольшее применение получила объемная закалка и последующий высокий отпуск (улучшение), выполняемые на стадии заготовки. Улучшению подвергают заготовки из среднеуглеродистых конструкционных сталей марок 40X, 45, 40XГМА до твердости HRC 28-36, на которых впоследствии нарезается резьба. Вместе с тем следует признать, что указанная твердость решает проблему обеспечения



общей прочности детали, но не витков резьбовых соединений. Кроме того, твердость HRC 28-36 не обеспечивает высокую износостойкость резьбы в условиях абразивного износа и больших контактных нагрузок. Недостаточная прочность витков резьбы (особенно резьбы ниппельной части труб) и износостойкость вызывают серьезные трудности при свинчивании резьбового соединения ниппеля и муфты бурильных труб и других деталей. Процессы объемной термической обработки являются трудо- и энергозатратными, имеют ограниченное применение из-за размеров деталей и снижают усталостную прочность деталей с концентраторами напряжений (резьба, галтели).

Среди методов химико-термической обработки (ХТО) деталей с резьбой наибольшее применение получили азотирование и карбонитрация. Однако указанные методы ХТО являются сложными в реализации, требуют соблюдения высокой культуры производства, имеют ограничения по размеру обрабатываемых заготовок, не могут быть реализованы при восстановлении деталей с резьбой [4].

Создание конкурентной продукции предусматривает возможность повышения надежности работы машин и технологического оборудования на всех этапах технологической подготовки, производства, эксплуатации и технического обслуживания. При этом не менее важными являются показатели экономической эффективности методов повышения надежности техники.

Наиболее эффективным направлением снижения себестоимости изготовления деталей и повышения качества машин являются технологии обработки поверхностей концентрированными потоками энергии (КПЭ). Способы обработки поверхностей КПЭ имеют ряд общих закономерностей: значительное тепловое воздействие на ограниченные участки поверхности; высокая скорость нагрева материала до температуры фазовых превращений, а зачастую и выше; пластическое деформирование нагретого материала; быстрое охлаждение нагретого участка детали за счет отвода теплоты нижележащим слоем детали. Одним из таких методов является электромеханическая обработка (ЭМО) деталей с резьбой.

Технология электромеханической обработки [1, 10] и ее направления: электромеханическая поверхностная закалка [2, 11], отделочно-упрочняющая электромеханическая обработка [3], отделочно-упрочняюще-калибрующая электромеханическая обработка, упрочняющее электромеханическое восстановление – основаны на использовании инновационного оборудования, приспособлений и инструмента для выполнения операций поверхностной закалки, отделочно-упрочняющей обработки и упрочняющего восстановления деталей концентрированным потоком электрической энергии промышленной частоты (50 Гц).

Локальный нагрев поверхности деталей при пропускании электрического тока при ЭМО имеет максимальный тепловой КПД. ЭМО не требует длительного печного нагрева, размер деталей не ограничен. Деталь при этом не деформируется, а ее поверхность имеет оптимальную шероховатость. Важным преимуществом ЭМО является возможность обработки сложных поверхностей: резьбы, шлицов, отверстий, деталей сложной геометрии.

Конкурентной особенностью технологий ЭМО является возможность гибкого управления параметрами скоростного контактного электронагрева и одновременного горячего пластического деформирования материала поверхностного слоя с целью формирования уникальных быстрозакаленных структур, изменения микрогеометрии поверхности и уменьшения размера зерна. Именно поверхностный слой наиболее нагруженных участков деталей во многом определяет сопротивление материала усталостному разрушению, контактную выносливость и другие важные эксплуатационные свойства.

При электромеханической поверхностной закалке (ЭМПЗ) заготовку закрепляют в трехкулачковый самоцентрирующий патрон токарного станка и ей сообщается главное движение вращения. Инструментальный ролик прижимается к поверхности заготовки с фиксированной силой, вращается вокруг своей оси и ему сообщается движение подачи. В зоне контакта инструментального ролика с обрабатываемой поверхностью заготовка нагревается до температуры 900-1100 °С и быстро охлаждается поверхностный слой. Размеры зоны нагрева поверхности зависят от технологических факторов обработки: усилия прижатия инструмента к детали, формы и размера инструментального ролика, подачи, твердости обрабатываемого материала, режимов обработки [9].

При ЭМПЗ наибольшее влияние на формирование структуры и, как следствие, свойств поверхностного слоя деталей оказывает температура в зоне контакта «инструмент – поверхность», проходящая электрическим током в результате преобразования электрической энергии в тепловую.



Рис. 1. Общий вид испытательного оборудования (а) и схема испытания (б)

При отделочно-упрочняющей электромеханической обработке (ОУЭМО) резьбы решена задача создания единого технологического комплекса операций механической, термической и финишной отделочно-упрочняющей обработки резьбы заготовок и деталей на станках общего и специального назначения.

При отделочно-упрочняюще-калибрующей электромеханической обработке (ОУКЭМО), помимо эффектов ОУЭМО, происходит исправление геометрических параметров резьбы, выполненных по стандарту твердосплавным инструментом по схеме трения скольжения.

При упрочняющем электромеханическом восстановлении (УЭМВ) воспроизводят геометрические параметры витков и впадины резьбы, а также обеспечивают поверхностную закалку, формирование оптимальной шероховатости и текстуры волокон металла во впадине и прилегающих боковых поверхностях за счет пластического термомеханического перераспределения материала [9].

**Методы и результаты исследования.** Испытания на циклическую долговечность резьбовых соединений после ОУЭМО проведены в лаборатории прочности НТЦ ОАО «КамАЗ» (г. Набережные Челны, Республика Татарстан). Для испытаний использовали аттестованную универсальную испытательную машину ZUZ-200 фирмы INOVA (рис.1). Исследование геометрических параметров резьбы и шероховатости поверхностей экспериментальных деталей выполняли с использованием следующего оборудования и инструментов: микроскопа УИМ-23 №770003; прибора контроля шероховатости Surcom-480A-14 №99930264; микрометра МВМ №83865; ЩЦ №430905. Замеры твердости деталей проводили в лаборатории металловедения по методу Роквелла (ГОСТ 9013-59) при нагрузке 1,5 кН на приборе ТР 5006; по методу Виккерса (ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007) при нагрузке 0,5 Н на приборе «Durimet».

Объект исследований – шпильки из малоуглеродистой стали 20Г2Р (ТУ 14-1-5490-2000) типоразмера М16×1,5 производства ОАО «БелЗАН» со следующим химическим составом:

Химические элементы	C	Mn	Cr	Si	S	Ni	B	P	Mo	Al
Содержание в стали, %	0,23	1,26	0,25	0,12	0,021	0,04	0,004	0,011	0,002	0,028

В испытаниях сравнивали две серии шпилек: с резьбой после накатывания, на одной стороне; с нарезанной резьбой после ОУЭМО – на другой стороне деталей (рис.2).

Исследование микроструктуры проводили на продольных микрошлифах, разрезанных по резьбе деталей. Исходная микроструктура деталей идентична и представляет собой ферритно-карбидную смесь – сорбит отпуска. Твердость в сердцевине деталей на расстоянии половины радиуса в сечении, удаленном от резьбового торца на величину одного диаметра, составляет HRC 32-34.



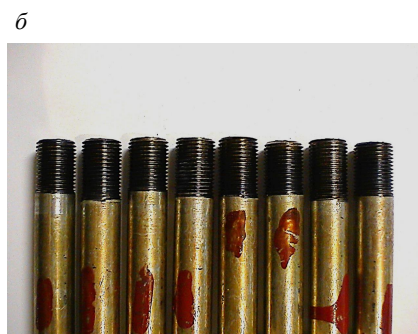


Рис.2. Фрагмент шпильки с резьбой нарезанной (а) и детали после ОУЭМО (б)

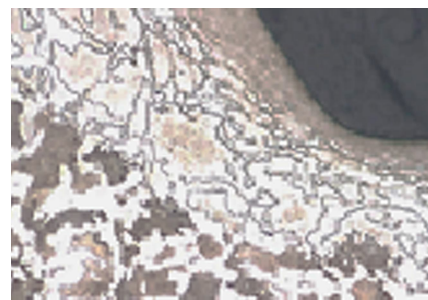


Рис.3. Фрагмент микроструктуры впадины после ЭМО

В наружной метрической резьбе наибольшая концентрация напряжений сосредоточена во впадине. Поскольку при ОУЭМО действуют одновременно силовой и термические факторы, то в результате образуется структура поверхностного слоя впадины с вытянутыми волокнами металла и закаленным на глубину более чем зона поверхностного пластического деформирования. Исследования впадины резьбы после ОУЭМО показали, что ее структура неоднородна (рис.3). На поверхности наблюдается сильно измельченная структура, размер зерна которой определить на оптических микроскопах невозможно. Ниже этой структуры отмечается вытягивание волокон металла вдоль впадины и боковых поверхностей, а далее – структура металла с характерными фазовыми изменениями без наличия следов пластического деформирования. Переходная зона занимает небольшую глубину и характеризуется чередованием закаленной структуры металла с исходной. Наличие такой структуры поверхностного слоя позволяет повысить качество резьбы при сохранении геометрических параметров. Обеспечить такие свойства резьбы другими известными способами невозможно.

Загрязненность металла деталей неметаллическими включениями оценивалась по ГОСТ 1778-70 методом «Ш 4» и соответствует по оксидам точечным и по сульфидам 1а баллу.

Металлографическими исследованиями установлено, что ОУЭМО резьбы позволяет устранить технологические концентраторы напряжений, формирует благоприятную текстуру волокон металла с фазовыми изменениями мелкодисперсной структуры поверхностного слоя, исключает окисление и обезуглероживание поверхностного слоя. Установлено повышение микротвердости поверхностного слоя резьбы стали 20Г2Р до твердости HRC 48-52 при глубине упрочнения до 0,35 мм, при сохранения исходной структуры и свойств нижележащих слоев (рис.4). Волокна металла вытянуты вдоль профиля впадины на глубине 0,01-0,04 мм.

При испытаниях на усталостную долговечность шпильки подвергали циклическому растяжению силой, изменяющейся во времени по гармоническому закону с параметрами  $F_{\min} = 1,5$  кН,  $F_{\max} = 32,4$  кН (коэффициент асимметрии цикла 0,05). Испытания проводились до разрушения деталей. Шпилька с накатанной резьбой имела длину 38 мм. Длина опытного участка шпильки с нарезанной плашкой резьбой и подвергнутой электромеханической обработке составляла 20 мм, а высота использованной для испытаний гайки 12,5 мм. Это позволяло в случае преждевременного разрушения накатанного участка резьбы накрутить гайку на оставшуюся часть и продолжить испытания для разрушения опытного участка резьбовой части шпильки.

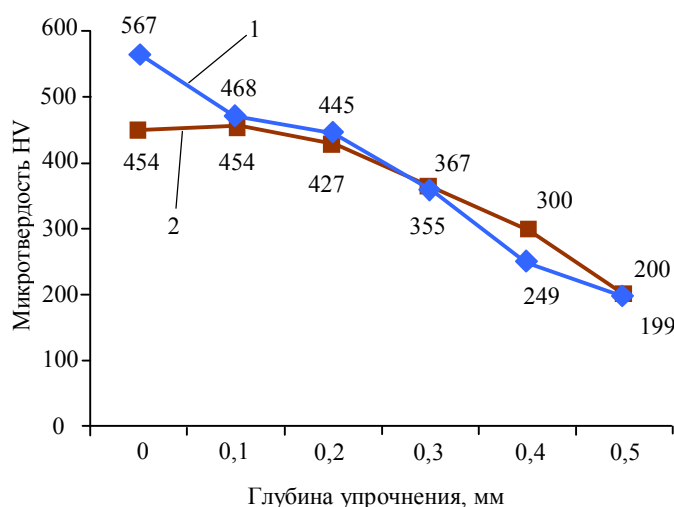


Рис. 4. Зависимость микротвердости от глубины упрочнения по боковым участкам витка резьбы после ЭМО  
1 – с правой; 2 – с левой стороны витка

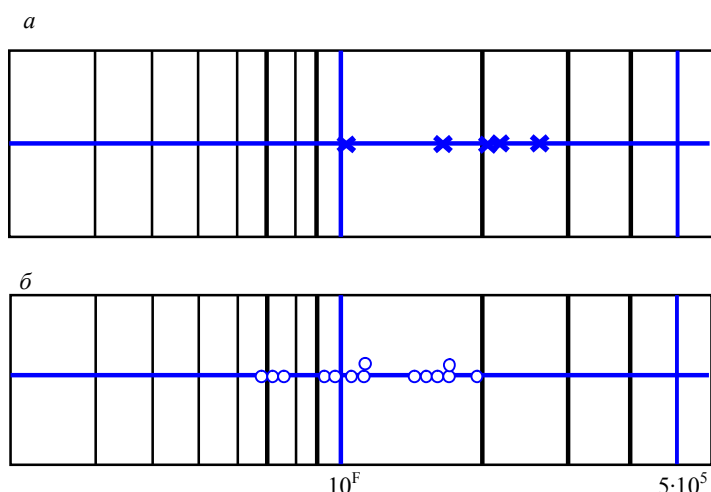


Рис.5. Результаты усталостных испытаний:

а – резьба нарезана плашкой и подвергнута ОУЭМО твердым сплавом ВК6;  
б – шпильки ОАО «БелЗАН»



Рис. 6. Фрагмент деталей с резьбой после ЭМО

Сравнительные испытания шпилек с резьбой, нарезанной плашкой и последующей ОУЭМО впадины, показали более стабильный результат с меньшим разбросом значений по сравнению с нарезанной резьбой без упрочнения. Среднее количество циклов до разрушения составило: для резьбы исходной – 141600; для резьбы после ОУЭМО – 177600. Все испытанные шпильки разрушились по первому опорному витку резьбы под гайкой. Для наглядности результаты испытаний образцов до разрушения приведены в логарифмическом масштабе (рис.5).

Таким образом, ОУЭМО впадины нарезанной резьбы шпилек из стали 20Г2Р на 25 % увеличивает усталостную долговечность резьбовых соединений и гарантирует стабильность результатов по сравнению с накатанной резьбой. Результаты эксплуатационных испытаний подтвердили эффективность технологии электромеханической обработки.

В настоящее время спроектированы и запущены в производство многофункциональное электросиловое оборудование и приспособления для реализации контактных взаимодействий инструмента с поверхностью деталей различной конфигурации [7, 8, 12, 13]. Разработаны рекомендации по выбору элементов технологической оснастки с учетом вида ЭМО и стойкости электрода-инструмента, а также конструктивно-технологических режимов обработки в зависимости от основных характеристик упрочненного поверхностного слоя, в том числе на деталях нефтепромыслового и бурового оборудования (рис.6).

Электромеханическая обработка резьбы формирует комплекс уникальных свойств винтовой поверхности, получить которые другими методами крайне затруднительно или невозможно [5, 6], в частности:

– возможность исправления геометрии резьбы полученной нарезанием, инструментом,

выполненным по техническим требованиям стандарта;

– формирование резьбы с закаленным поверхностным слоем и пластичной основой нижележащих слоев;

– отсутствие обезуглероживания и окисления поверхности;

– формирование благоприятной формы и расположения волокон металла вдоль опасного сечения впадины резьбы;

– получение оптимальной формы и высоты микронеровностей;

– получение поверхностной твердости до 5670 МПа при сохранении вязкой сердцевины с твердостью 1990 МПа;



- отсутствуют окисление, обезуглероживание и коробление деталей;
- волокна металла вытягиваются вдоль профиля основания резьбы;
- глубина деформированного слоя 0,02-0,08 мм, а глубина слоя с повышенной твердостью 0,04-0,35 мм;
- микрогеометрия поверхности не только уменьшается по высоте, но и приобретает плоскую форму вершин и скругленных микровпадин.

*Результаты применения ЭМО позволяет сделать следующие выводы:*

- отделочно-упрочняющая обработка наружной и внутренней резьбы деталей возможна на глубину до 0,35 мм с повышением микротвердости до 4 раз и одновременным улучшением шероховатости (обработка резьбы ниппеля НКТ 60,73, 89 НГДУ «Ямашнефть» ОАО ТАТНЕФТЬ);
- для витков резьбы деталей, подверженных пластическому деформированию, производится ОУЭМО боковых поверхностей резьбы HV 6000-8000 МПа, глубиной упрочнения 0,04-0,20 мм при сохранении вязкой сердцевины витков, шероховатость поверхностей Ra 1,25-0,63 мкм;
- для изделий, подверженных усталостному разрушению, формируется основание резьбы оптимальной формы с вытянутой вдоль основания текстурой металла и благоприятной микрогеометрией.

**Заключение.** Выполненные исследования определили пути нового направления повышения качества деталей с резьбой в области энерго- и ресурсосбережения, ресурса и надежности машин, снижения трудоемкости изготовления и восстановления деталей, повышения эффективности работы предприятий и организаций, защиты окружающей среды и создания конкурентоспособной продукции.

Разработки предназначены для предприятий отраслей общего и специального машиностроения, станкостроения, нефтегазодобывающих и нефтеперерабатывающих компаний, горно-обогатительных комбинатов и шахт, РЖД, транспортных и дорожно-строительных компаний, ЖКХ, водоканалов, метрополитенов, кондитерских объединений, энергетических и других компаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Багмутов В.П. Влияние структурного состояния углеродистых сталей на усталостную прочность при электромеханическом упрочнении / В.П.Багмутов, С.Н.Паршев, В.Ю.Притыченко // Вестник ВолГТУ. 2008. Т.4. № 9(47). С.5-7.
2. Исследование влияния режимов сегментной электромеханической закалки на формирование участков регулярной микротвердости / А.В.Морозов, Л.В.Федорова, Н.Н.Горев, Н.И. Шамуков // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 2 (187). С. 24-27.
3. Отделочно-упрочняющая электромеханическая обработка стали 8620 / Л.В.Федорова, С.К.Федоров, Ю.С.Иванова, В.В.Сидоренко // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 8. С. 39-43.
4. Пахомова С.А. Эффективность деформационного упрочнения цементованных сталей / С.А.Пахомова, Н.М.Рыжов // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Серия: Машиностроение. 1999. № 2. С.61-68.
5. Патент № 2482942 РФ. Способ изготовления резьбы на детали / Л.В.Федорова, С.К.Федоров, В.С. Жаренников, М.В.Песин, Ю.П.Смольский. Заявл. 24.06.2011. Оpubл. 27.05.2013. Бюл. № 15.
6. Патент № 2486994 РФ. Способ изготовления резьбы на детали / Л.В.Федорова, С.К.Федоров, В.С.Жаренников, М.В.Песин, Ю.П.Смольский. Заявл.24.06.2011. Оpubл. 10.07.2013. Бюл. № 19.
7. Патент №2176033 РФ. Устройство для перекачки высоковязких жидкостей / М.В.Воронина, В.Г.Артёмьев, И.Г.Кушнаренко, Ф.Г.Шагунов, А.А. Пылин. Заявл. 05.05.1999. Оpubл. 20.11.2001. Бюл. № 32.
8. Применение технологии электромеханической обработки в ремонтном производстве ОАО «Сызранский нефтеперерабатывающий завод» / С.К.Федоров, Л.В.Федорова, В.Т.Сараев, Ф.К.Клюев // Научно-технический вестник НК «Роснефть». 2010. № 4. С. 44-47.
9. Повышение усталостной прочности метрической резьбы упрочняющим электромеханическим восстановлением / Л.В.Федорова, В.Б.Салов, С.К.Федоров, В.А. Фрилинг // Вестник Ульяновской сельскохозяйственной академии. 2012. № 2(18). С.106-111.
10. Федорова Л.В. Электромеханическая обработка / Л.В.Федорова, С.К.Федоров // Ремонт. Инновации. Технология. Модернизация. 2012. № 2(70). С. 14-16.
11. Федоров С.К. Повышение износостойкости стальных деталей электромеханической поверхностной закалкой / С.К.Федоров, Л.В.Федорова, Ю.С.Иванова // Межотраслевой институт «Наука и образование». Екатеринбург, 2015. № 1(8). С.8-11.
12. Федорова Л.В. Исследование влияния содержания углерода на микротвердость при избирательной электро-механической закалке трибонагруженного участка отверстия / Л.В.Федорова, А.В.Фрилинг, А.В.Морозов // Известия ТулГУ. 2012. Вып.3. С.18-21.
13. Электромеханическая обработка шпилек крепления колеса автомобилей / Л.В.Федорова, С.К.Федоров, А.Батурин, В.Б. Салов // Сельский механизатор. 2011. № 10. С. 40-41.

**Авторы:** Л.В.Федорова, д-р техн. наук, профессор, [tomd@yandex.ru](mailto:tomd@yandex.ru) (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия), Ю.С.Иванова, канд. техн. наук, доцент, [tomd@yandex.ru](mailto:tomd@yandex.ru) (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия), М.В.Воронина, канд. техн. наук, доцент, [maria.vv@mail.ru](mailto:maria.vv@mail.ru) (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья принята к публикации 23.11.2016.