

## Материаловедение

УДК 621. 791.356

*С.М. Ахметсагиров<sup>1</sup>, А.Г. Ицук<sup>1</sup>, М.А. Сальников<sup>2</sup>, Г.В. Бичуров<sup>2</sup>*

### **ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ УДАРНУЮ ПРОЧНОСТЬ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ЗУБКОВ БУРОВЫХ ДОЛОТ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА**

<sup>1</sup> ОАО «Волгабурмаш»  
443004, Самара, ул. Грозненская, 1

<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Исследованы прочностные характеристики твердосплавных зубков буровых долот в зависимости от химической неоднородности и химического состава в виде углеродного баланса.*

***Ключевые слова:** твердосплавные зубки буровых долот, углеродный баланс, прочностные характеристики*

Твердые сплавы на основе карбида вольфрама с кобальтовой связкой (сплавы группы ВК) широко используются для вооружения буровых долот [1-5]. Твердосплавные зубки закрепляются в шарошке, которая приводится во вращение и производит бурение путем периодических ударов зубков о горные породы различной твердости. В связи с этим одной из важнейших характеристик зубков является их стойкость в эксплуатации, о которой можно судить по испытаниям на циклическую стойкость зубков в эксперименте [3-4].

В настоящей работе экспериментальное исследование циклической стойкости зубков из сплавов ВК10 и ВК13 проводилось на установке специальной конструкции. Принцип действия испытания заключается в следующем. Перед испытанием исследуемый зубок запрессовывался с натягом в специальную оправку на глубину его крепления в шарошке. Оправка через датчик силы устанавливалась на штоке гидроцилиндра ударного механизма. Шток, совершая вертикальные возвратно-поступательные перемещения, совершал соударение с вершиной закрепленного на нем зубка о металлическую плиту с заданным усилием удара, контролируемого датчиком. В качестве критерия стойкости зубка к ударным воздействиям принимали

---

<sup>1</sup> Ахметсагиров Сергей Маратович, мастер.

Ицук Андрей Георгиевич, кандидат технических наук, президент.

<sup>2</sup> Сальников Михаил Александрович, аспирант.

Бичуров Георгий Владимирович, доктор технических наук, профессор.  
[shs@samgtu.ru](mailto:shs@samgtu.ru)

количество циклов нагружения до разрушения зубка. Количество ударов фиксировалось датчиком. При появлении трещины или разрушения зубка испытание прекращалось.

В среднем испытания на циклическую ударную стойкость проводились до 4000 циклов нагружения. Режимы испытания выбирались для каждого типа зубка индивидуально в зависимости от формы и габаритов рабочей части последнего. Зубки, простоявшие 4000 циклов нагружения без разрушения, условно считались зубками очень высокого качества. Зубки, разрушившиеся при количестве циклов меньше 4000, считались зубками низкого качества.

### **1. Влияние химической неоднородности на циклическую ударную стойкость**

Исследованию подверглись твердосплавные зубки из сплавов ВК10 и ВК13 по сто штук одного типа из одной партии смеси, прошедшие одинаковую обработку на всем маршрутном технологическом процессе. В ходе исследований было установлено, что циклическая стойкость твердосплавных зубков, изготовленных в одинаковых условиях, может сильно различаться: образцы из ВК10 выдерживали от 65 до 7800 циклов нагружений, а из ВК13 – от 49 до 10000 ударов. Существенное различие в циклической стойкости позволило предположить наличие неоднородности в структуре твердого сплава. Для уточнения характера структурной неоднородности были проведены следующие исследования:

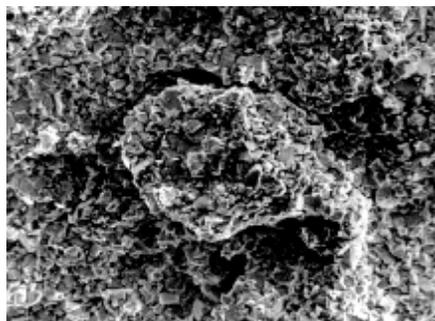
– исследование с помощью растрового электронного микроскопа «Jeol» топографии поверхности изломов зубков, обладающих максимальной и минимальной циклической стойкостью;

– исследование фазового состава поверхностей, прилегающих к поверхности разрушения образцов, с помощью рентгеновского дифрактометра.

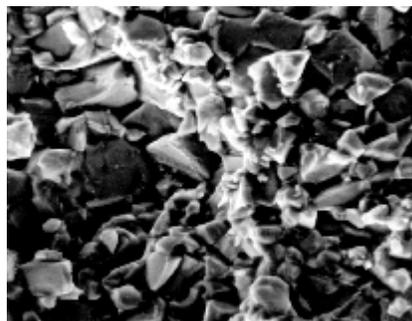
*Исследование твердосплавных зубков с минимальной циклической стойкостью из сплава ВК10 показало следующее.*

1. В верхней конической рабочей части зубка сплав не пропечен, о чем свидетельствуют отдельные несцементированные связкой частицы карбида вольфрама, находящиеся на поверхности излома (рис. 1).

2. Разрушение образца идет по поверхности, где имеет место низкое и неравномерное содержание кобальта (рис. 2).



Р и с. 1. Фрактография вершины излома зубка из сплава ВК10 с минимальной циклической стойкостью, соответствующей 65 ударам ( $\times 1000$ )



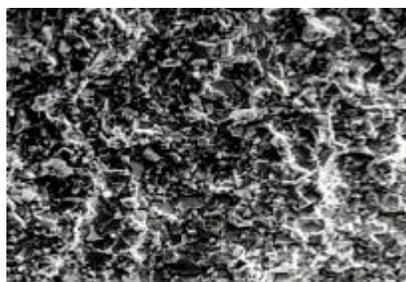
Р и с. 2. Фрактография вершины излома зубка из сплава ВК10 с минимальной циклической стойкостью, соответствующей 65 ударам ( $\times 4000$ )

Так как частицы кобальта более мелкие, чем частицы карбида вольфрама, при большом увеличении микроскопа хорошо заметно их скопление в виде полосы белого цвета. Таким образом, данный сплав имеет кобальтовую неоднородность, и его разрушение могло предположительно произойти из-за отсутствия кобальтовой связки между частицами карбида вольфрама. Такой эффект может появляться в результате неравномерного смешивания компонентов исходной шихты.

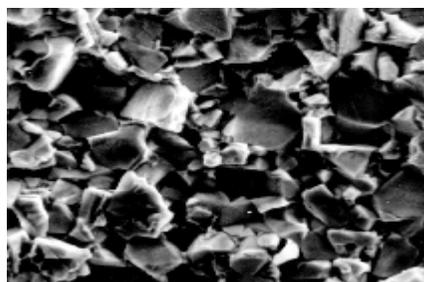
*Исследование твердосплавных зубков с максимальной циклической стойкостью из сплава ВК10 дало следующие результаты.*

1. Топография поверхности имеет ровный рельеф разрушения (рис. 3 и 4).
2. Кобальтовая связка распределена более равномерно.

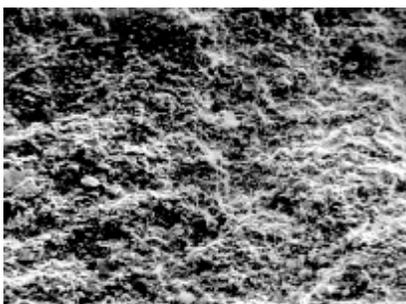
В данном случае при циклических нагрузках наблюдается не осевое разрушение зубка, а разрушение небольшими участками, что характерно для твердых сплавов с высокими физико-механическими характеристиками.



Р и с. 3. Фрактография излома зубка из сплава ВК10 с максимальной циклической стойкостью, соответствующей 7800 ударам ( $\times 1000$ )



Р и с. 4. Фрактография излома зубка из сплава ВК10 с максимальной циклической стойкостью, соответствующей 7800 ударам ( $\times 4000$ )



Р и с. 5. Фрактография излома зубка из сплава ВК13 с минимальной циклической стойкостью, соответствующей 49 ударам ( $\times 1000$ )

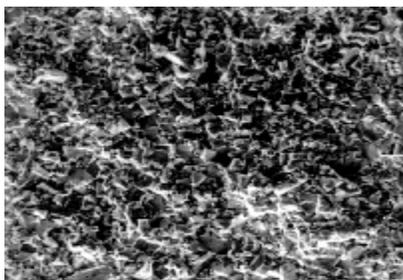


Р и с. 6. Фрактография излома зубка из сплава ВК13 с минимальной циклической стойкостью, соответствующей 49 ударам ( $\times 4000$ )

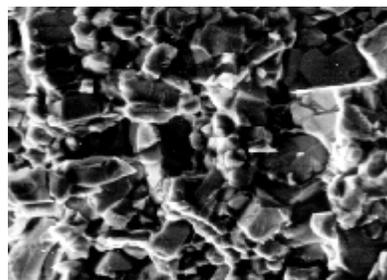
Анализируя фрактографии изломов зубков и фазовый состав сплава ВК13, можно сделать аналогичные выводы. На рисунках, отражающих фрактографию изломов зубков из сплава ВК13 с минимальной циклической стойкостью (49 ударов), хорошо просматривается кобальтовая неоднородность (рис. 5 и 6).

Напротив, исследование фрактографии излома зубков из сплава ВК13 с максимальной циклической стойкостью (около 10000 ударов) показало ровную поверхность разрушения, отсутствие неоднородностей и углеродных пленок (рис. 7 и 8).

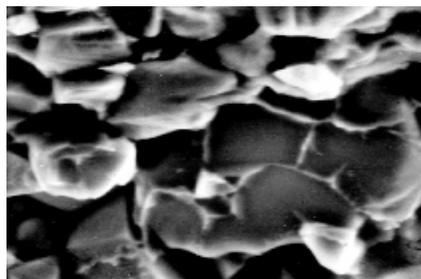
При 10000-кратном увеличении микроскопа видно, что кобальтовая связка распределена даже в трещинах частицы карбида вольфрама (рис. 9). Аналогичное явление было обнаружено и на лучших зарубежных твердосплавных зубках фирм «Smith» (Швеция), «Hughes» и «Reed» (США). В этом случае хрупкого разрушения частиц карбида вольфрама не наблюдается. Разрушающиеся частицы карбида хотя и имеют сетку трещин, но прочно удерживаются кобальтовой связкой, которая, в свою очередь, не позволяет произойти хрупкому разрушению частиц. В связи с этим как сам сплав, так и изделие остаются рабочими, несмотря на появление сетки трещин в частицах карбида.



Р и с. 7. Фрактография излома зубка из сплава ВК13 с максимальной циклической стойкостью, соответствующей 10000 ударам (×1000)



Р и с. 8. Фрактография излома зубка из сплава ВК13 с максимальной циклической стойкостью, соответствующей 10000 ударам (×4000)



Р и с. 9. Фрактография излома зубка из сплава ВК13 с максимальной циклической стойкостью, соответствующей 10000 ударам (×10000)

Расшифровка рентгенограмм поверхностей изломов показала, что фазовый состав приповерхностных слоев зубков у образцов с минимальной и максимальной циклической стойкостью примерно одинаков.

## 2. Влияние углеродного баланса на циклическую ударную стойкость

Исследованию подверглись различные типы твердосплавных зубков из сплавов ВК10 и ВК16, прошедшие одинаковую обработку на всем маршрутном технологическом процессе.

В ходе исследования было выявлено, что из всех испытываемых зубков большая часть характеризуется очень низкими и нестабильными показателями циклической стойкости. В то же время остальная часть зубков исследуемой партии имела высокие показатели циклической стойкости. Чем же объясняется такая разница между твердосплавными зубками одной и той же партии?

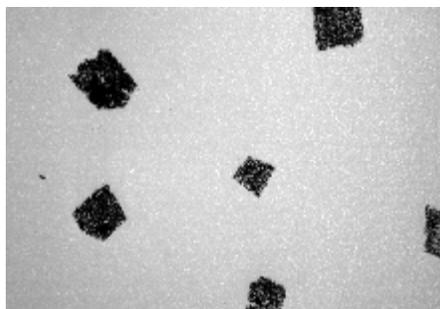
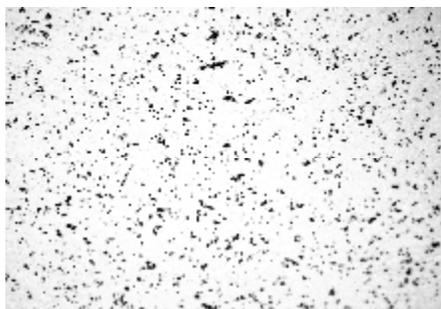
Исследование физико-механических свойств, таких как твердость, плотность, предел прочности при поперечном изгибе, остаточная пористость, микроструктура, не выявили разницы между ними. Однако известно, что снижение пластических свойств твердого сплава может быть связано с появлением вольфрама в кобальтовой связке, и чем больше вольфрама растворено в кобальте, тем ниже пластические свойства твердого сплава, а значит, увеличивается склонность сплава к хрупкому разрушению при ударных циклических нагрузках. В свою очередь, растворение

вольфрама в кобальте связано со снижением содержания общего углерода в сплаве. Как правило, твёрдый сплав формируется из карбидов вольфрама с различной степенью зернистости вольфрама и с содержанием общего углерода  $6,10 \pm 0,4\%$  (связанного не менее  $6,06\%$ ) и кобальта. Таким образом, для сплава ВК10 (90% WC + 10% Co) оптимальное содержание углерода должно находиться в пределах  $5,50 \pm 0,4\%$ , т.е.  $5,45-5,53\%$ , а для сплава ВК16 (84% WC + 16% Co) –  $5,12 \pm 0,4\%$ , т.е.  $5,08-5,16\%$ . Однако в процессе спекания содержание углерода в сплавах может изменяться в зависимости от используемых методов спекания.

В последнее время для спекания твердых сплавов широко используют следующие два основных метода.

*Спекание по отдельным циклам (режим 1).*

Этот метод включает в себя два этапа спекания: предварительное спекание в проходной печи толкательного типа с водородной атмосферой с целью удаления пластификатора (парафина) и окончательное спекание в вакуумной камерной печи с водородным охлаждением либо в вакуумно-компрессионной камерной печи по короткому циклу без депарафинизации. В ходе исследований выяснилось, что спекание по отдельным циклам не дает оптимального и стабильного содержания общего углерода в спеченных зубках как для сплава ВК10, так и для сплава ВК16. Анализ на содержание углерода общего в зубках для сплава ВК10 показал  $5,35-5,45\%$ , для сплава ВК16 –  $5,00-5,10\%$ . Эти значения принято считать пониженными. Исследование микроструктуры зубков выявило наличие  $\eta$ -фазы, отвечающей составу  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  (рис. 10). Исследуемые твердосплавные зубки характеризовались низкими значениями ударной циклической стойкости.



Р и с. 10.  $\eta$ -фаза озерковой формы в твердосплавных зубках с низкой циклической стойкостью ( $\times 400$ )

Что же происходит с твердосплавными зубками во время отдельных циклов спекания и как можно минимизировать потерю углерода в сплавах? Известно, что во время процесса предварительного спекания твердосплавных изделий помимо удаления парафина происходит еще и обезуглероживание сплава, которое вызывается химической реакцией углерода с водородной атмосферой печи при температуре выше  $450^\circ\text{C}$  с образованием метана по реакции  $\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$ . Одним из шагов к минимизации обезуглероживания в процессе предварительного спекания является снижение температуры спекания в последней зоне печи до  $450^\circ\text{C}$  вместо предусмотренных технологическим процессом  $550^\circ\text{C}$ . Как показали исследования, этой температуры ( $450^\circ\text{C}$ ) достаточно для полного удаления парафина из твердого сплава, в то время как она обеспечивает наименьшую потерю углерода в сплаве. Результаты экспери-

ментов свидетельствуют о том, что потеря углерода после предварительного спекания снизилась до 0,03-0,07% вместо 0,10-0,15%. Другим способом снижения потери углерода из твердого сплава, согласно исследованиям, является использование более сухого и чистого водорода.

При окончательном спекании в вакуумных печах с водородным охлаждением происходит дальнейшее обезуглероживание твердого сплава. Здесь процесс потери углерода идет по иной схеме. После процесса предварительного спекания активный кобальт способен окисляться кислородом воздуха во время выгрузки твердого сплава из печи. Находящийся в твердом сплаве кислород при высоких температурах вступает в реакцию с углеродом с образованием углекислого газа по реакции  $C + O_2 \rightarrow CO_2$ . Чем выше в сплаве содержание кислорода, тем сильнее сплав будет обезуглероживаться во время вакуумного спекания. Проблема может быть решена путем минимизации времени пребывания твердого сплава на воздухе между предварительной и окончательной стадиями спекания.

*Спекание по полному (совмещенному) циклу (режим 2).*

Этот метод спекания позволяет совместить процесс предварительного спекания с окончательным спеканием твердосплавных изделий в одной вакуумно-компрессионной камерной печи. В этом случае твердосплавные изделия сразу после операции прессования загружаются в печь общей массой не более 1500 кг и проходят высокотемпературную обработку. Весь процесс спекания можно разделить на четыре этапа. Первый и самый длительный по времени этап – это удаление пластификатора (парафина) из твердосплавных изделий. Отличительной особенностью такого метода спекания является использование в качестве рабочей среды инертного газа аргона, а не активного водорода. Поэтому твердосплавные изделия во время первого этапа спекания обезуглероживаться не будут. При этом аргон должен быть сухим и чистым с содержанием основного вещества не менее 99,995%, точкой росы менее  $-65$  °С. После удаления парафина следует второй этап, представляющий собой вакуумное спекание при пониженном давлении аргона при температуре 1390-1410 °С. Выбор температуры и времени спекания зависит от марки сплава. Слишком большая продолжительность спекания нежелательна, так как при этом может более интенсивно протекать изменение состава спекаемых изделий (обезуглероживание или науглероживание, потеря кобальта при спекании в вакууме). При вакуумном спекании формируются структура и конечные свойства твердосплавных изделий. На третьем этапе происходит обработка изделий высоким давлением аргона. В этом случае во внутреннюю рабочую камеру печи при температуре спекания подается аргон под давлением до 5 МПа. При этом происходит максимальное уплотнение твердого сплава и соответственно уменьшение остаточной пористости.

Все исследуемые твердосплавные зубки, прошедшие спекание по полному циклу в вакуумно-компрессионной камерной печи, имели в своем составе 5,50-5,55% углерода из сплава ВК10 и 5,10-5,15% – из сплава ВК16. Твердосплавные зубки показали высокие и стабильные характеристики ударной циклической стойкости.

В табл. 1 дан сравнительный анализ физико-химических свойств твердосплавных зубков, спеченных по разным режимам.

Сравнивая результаты лабораторных анализов твердосплавных зубков, спеченных по разным режимам, можно сделать вывод, что из всех анализируемых параметров более всего отличаются показатели по общему углероду и коэрцитивной силе. Последняя повышается с уменьшением содержания углерода, приводящего к ле-

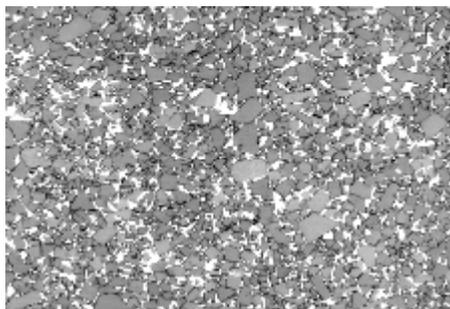
гированию восстановленным вольфрамом кобальтовой связки и изменению магнитных свойств.

Т а б л и ц а 1

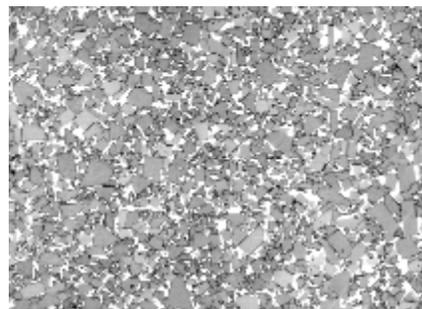
**Сравнительный анализ физических и химических свойств  
твердосплавных зубков, спеченных по разным режимам**

Анализируемые параметры	Свойства зубков, спеченных по режиму 1	Свойства зубков, спеченных по режиму 2	Технические требования сплава ВК10
Плотность, г/см <sup>3</sup>	14,55	14,51	14,43-14,63
Твердость, HRA	87,8	87,8	87,4-88,2
Коэрцитивная сила, Э	87	80	70-90
Пористость, шкала	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	Max A <sub>1</sub> , B <sub>1</sub> , C <sub>1</sub>
Средний размер зерна, мкм	4,3	4,2	Не регламентируется
Микроструктура	Равномерная	Равномерная	Равномерная, без крупных зерен и скоплений кобальта
C <sub>общ</sub> , %	5,40	5,52	5,46-5,54

Исследования микроструктуры твердосплавных зубков по режиму 1 и 2 идентичны. Как свидетельствуют рис. 11 и 12, кобальт распределен между карбидными частицами вольфрама равномерно, строение и размер зерен одинаковы.



Р и с. 11. Микроструктура зубка ВК10, спеченного по режиму 1



Р и с. 12. Микроструктура зубка ВК10, спеченного по режиму 2

Т а б л и ц а 2

**Результаты испытания ударной циклической стойкости  
твердосплавных зубков из сплава ВК10**

Давление в гидросистеме станда при испытании, МПа	Результаты испытаний зубков, спеченных по режиму 1		Результаты испытаний зубков, спеченных по режиму 2	
	Количество циклов нагружения	Характер разрушения зубков	Количество циклов нагружения	Характер разрушения зубков
1,6-1,8	4000	Не разрушился	4000	Не разрушился
1,8	220	Осевая трещина	4000	Не разрушился
1,8-2,0	120	Осевая трещина	4000	Не разрушился
1,8-2,0	1900	Осевая трещина	4000	Не разрушился

Результаты исследования циклической стойкости зубков из сплава ВК10, спеченных по режиму 1 и 2, представлены в табл. 2.

Анализируя результаты циклической стойкости зубков из сплава ВК10, можно сделать вывод о том, что спекание твердого сплава при использовании совмещенного режима спекания в вакуумно-компрессионной камерной печи является наиболее предпочтительным.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Третьяков В.И.* Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 528 с.
2. *Третьяков В.И., Клячко Л.И.* Твердые сплавы, тугоплавкие металлы, сверхтвердые материалы. – М.: Руда и металлы, 1999. – 264 с.
3. *Либенсон Г.А.* Производство порошковых изделий. – М.: Металлургия, 1990. – 240 с.
4. *Панов В.С., Чувилин А.М.* Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. – М.: МИСиС, 2001. – 428 с.
5. *Панов В.С., Нарва В.К.* Научные положения регулирования свойств спеченных твердых сплавов // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2004. – №6. – С. 46-53.

*Статья поступила в редакцию 1 апреля 2008 г.*

UDC 621. 791.356

### **EFFECT OF CHEMICAL INHOMOGENEITY AND CHEMICAL COMPOSITION ON CYCLIC IMPACT DURABILITY OF TUNGSTEN CARBIDE INSERTS OF DRILL BITS**

*S.M. Akhemsagirov<sup>1</sup>, A.G. Ischuk<sup>1</sup>, M.A. Salnikov<sup>2</sup>, G.V. Bichurov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> OAO "Volgaburmash"  
1, Groznenskaya str., Samara, 443004

<sup>2</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

*Strength characteristics of tungsten carbide inserts of mining bits have been investigated in the dependence from chemical inhomogeneity and chemical composition in the form of carbon balance.*

**Key words:** *tungsten carbide inserts of mining bits, carbon balance, strength characteristics*

---

<sup>1</sup> *Sergey M. Akhemsagirov, master.  
Andrey G. Ischuk, Candidate of Technical Sciences, general director.*  
<sup>2</sup> *Mihail A. Salnikov, Postgraduate student.  
Georgiy V. Bichurov, Doctor of Technical Sciences, Professor.  
[shs@samgtu.ru](mailto:shs@samgtu.ru)*