

УДК 621.9.06: 678.5
DOI: 10.12737/22052

С.В. Гайст, С.А. Катаева, А.М. Марков, П.О. Черданцев, Е.Ю. Лапенков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТЕКЛОПЛАСТИКА

Рассмотрены проблемы механической обработки стеклопластиков, в частности операции фрезерования. Особое внимание уделено износу режущего инструмента и его влиянию на температуру в зоне резания. Получены математические зависимости, позволяющие оценить влияние режимных па-

раметров на период стойкости режущего инструмента и температуру.

Ключевые слова: композитные материалы, стеклопластик, фрезерование, температура, износ режущего инструмента, режимы резания.

S.V. Gaist, S.A. Katayeva, A.M. Markov, P.O. Cherdantsev, E.Yu. Lapenkov

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF QUALITY METRICS FORMATION PROCESS DURING PLASTIC MILLING

Composite materials are widely used in mechanical engineering, but at edge cutting machining, in particular, during milling these materials a number of peculiarities arise which must be taken into account at the definition of cutting modes and design-geometrical parameters of cutters. Besides, new composite materials machining does not allow using effectively the recommendations developed earlier. In such a way, to solve such a problem it is necessary to carry out experimental investigations on the analysis of the influence of milling mode characteristics and design-geometrical of a tool upon values of roughness of a surface processed and tool wear. As a cutter for investigations there were taken hard-metal end-milling cutters of TC-8 (tungsten-cobalt) type, the experimental samples – pipes made of composite material with oblique longitudinal-transverse fiber winding (OLTFW). As varied

parameters were adopted cutting modes: cutting speed V , m/min, feed S , mm/tooth and milling depth t , mm. During the experiments were controlled the following parameters: tool wear Δ , mkm, roughness of the surface R_a , mkm and a depth of a faulty layer h , mkm.

To carry out the experiments there was offered an original design of an assembly milling cutter which allows defining in an experimental way optimum geometrical parameters of a tools to achieve output milling parameters specified. On the basis of experiments data there are obtained dependences allowing the estimate of parameter modes influence upon the period of cutter duration at the same time a temperature is affected mostly by a milling depth and a feed on a tooth affects the wear of an end flank.

Key word: composite materials, glass-fiber material, milling, temperature, cutter wear, cutting modes.

Введение

В настоящее время композитные материалы, в частности стеклопластики, нашли широкое распространение в различных областях машиностроения благодаря их уникальным свойствам, таким как: малый вес, высокая коррозионная стойкость, относительно высокая прочность, хорошие теплоизоляционные свойства. Современные технологии позволяют изготовить изделия из стеклопластиков максимально приближенными к окончательной форме, однако полностью исключить механическую обработку не удаётся. В частности, во многих случаях возникает необходимость в обработке фрезерованием различных пазов, окон, плоскостей и усту-

пов, являющихся либо исполнительными поверхностями, либо поверхностями, по которым осуществляется неразъёмное сопряжение деталей. При этом требования к точности обработки составляют 10 – 11 квалитеты, к качеству поверхности – R_a не более 10 мкм (а в ряде случаев – не более 2,5 мкм).

Механическая обработка несколько отличается от обработки металлов, что вызвано рядом особенностей стеклопластиков: низкая теплопроводность, абразивное воздействие наполнителя, разрушение структуры полимерного связующего при резании и упругие свойства материала [4].

Выбор режущего инструмента для этих операций достаточно труден в силу специфики обрабатываемого материала и наличия на рынке большого ассортимента конструкций, разработанных непосредственно для обработки данного композиционного материала.

В соответствии существующими рекомендациями по фрезерованию стеклопластиков необходимо использовать инструмент с острой режущей кромкой, большим задним углом и малым радиусом режущей кромки. Для улучшения отвода стружки и снижения сил трения между поверхностями инструмента и заготовки передняя и задние поверхности должны иметь низкую шероховатость. Кроме того, важно обеспечить высокую стойкость инструмента, поскольку армирующие волокна интенсивно изнашивают режущую кромку, что приводит к увеличению силы резания и тепловыделения, а также снижению качества обработанных поверхностей.

Основными дефектами, возникающими при механической обработке, являются: разрушение матрицы, выдергивание

волокон, непрорез волокон, термическая деструкция матрицы. Происхождение этих дефектов обусловлено особенностями лезвийной обработки стеклопластика. В отличие от металлов стеклопластики обладают низкой теплопроводностью и теплостойкостью. В связи с этим отвод тепла из зоны резания вместе со стружкой и в обрабатываемое изделие затрудняется, и, как следствие, режущий инструмент работает в термически напряжённых условиях.

Кроме того, при температурах выше 300 – 350 °С начинаются интенсивная термодеструкция и разложение полимерного связующего, что приводит к его налипанию на режущие кромки инструмента (рис. 2). Наличие разогретого связующего в зоне резания также губительно сказывается на стойкости инструмента, являясь причиной его адсорбционно-усталостного износа.

Увеличение температур в зоне резания также приводит к резкому ухудшению свойств материала, появлению прижогов и увеличению дефектного слоя (рис. 1).



Рис. 1. Расслоение, прижоги обработанной поверхности



Рис. 2. Двухзубая концевая фреза (инструментальный материал - P6M5) после работы при температуре свыше 300°С

Помимо этого, на сегодняшний день очень мало справочной литературы (за исключением частных случаев) по назначению конструктивно-геометрических параметров режущего инструмента и режимов резания. Данная литература не учитывает огромный объём марок стеклопластика, созданный более чем за четыре десятилетия, прошедшие с 1974 года. И этот объём продолжает расширяться высокими темпами: параллельно с развитием соответ-

ствующих отраслей промышленности создаются новые материалы с высокими потребительскими свойствами. Всё это во многих случаях приводит к неэффективности механической обработки стеклопластиков. Если к обработке существующих хотя бы несколько лет марок предприятия путём проб и ошибок хоть как-то адаптируются, то при внедрении новых сложности неизбежны.

Методика экспериментальных исследований

Таким образом, для решения данных задач необходимы рекомендации по выбору конструктивно-геометрических параметров режущего инструмента, а также назначению режимов резания.

Основными задачами экспериментальных исследований являются:

- изучение влияния режимных характеристик процесса фрезерования и конструктивно-геометрических параметров инструмента на величину шероховатости обработанной поверхности и износа инструмента;

- получение эмпирических зависимостей шероховатости обработанной поверхности от режимных параметров процесса фрезерования и конструктивно-геометрических параметров;

- изучение влияния режимных характеристик процесса фрезерования на величину температуры в зоне резания;

- получение эмпирических зависимостей температуры от режимных характеристик процесса фрезерования.

Для решения поставленных задач была спроектирована оригинальная конструкция фрезы (рис. 3.), представляющая собой цельный цилиндрический корпус 1 диаметром 50мм из стали 40Х со специальными прямоугольными пазами определённой глубины, расположенными в шахматном порядке. В паз вставляется твердосплавная пластинка 2, которая ориентируется под определённым углом ω парой клиньев 3, после чего клинья фиксируются винтами 4.

Меняя геометрию вставных клиньев и твердосплавной пластинки, можно варьировать углы ω, α, γ . Кроме того, можно изменять число зубьев z .

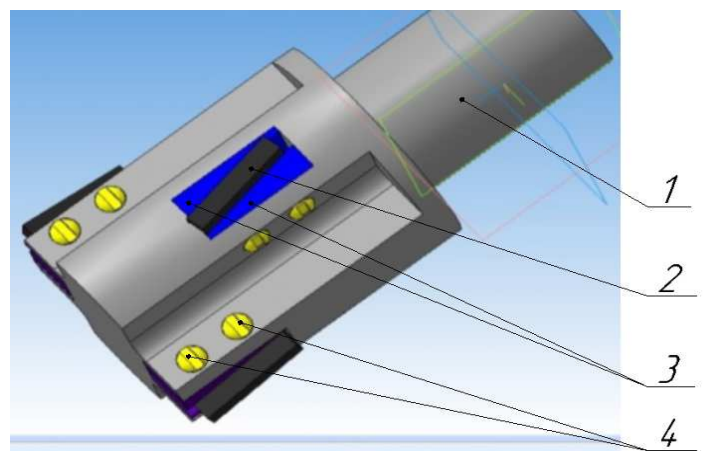


Рис. 3. Экспериментальная фреза

В ходе предварительных исследований было выявлено, что исследование процесса резания стеклопластика необходимо проводить со следующей геометрией инструмента:

1. Передний угол $\gamma=15^{\circ}$; задний угол $\alpha=20^{\circ}$; угол подъема винтовой канавки $\omega=30^{\circ}$.

2. Передний угол $\gamma=10^{\circ}$; задний угол $\alpha=20^{\circ}$; угол подъема винтовой канавки $\omega=30^{\circ}$.

В качестве исследуемого режущего инструмента были взяты концевые фрезы диаметром 10 мм из твердосплавного материала марки ВК8 в трехзубом исполнении, предназначенные для обработки уступов, плоскостей, пазов и закрытых контуров (рис. 4).

Технические требования к фрезам определяются согласно ГОСТ 18372-73. Твердость рабочей части в пределах 88-91 HRA, хвостовиков - 37-53 HRC. Параметры шероховатости: передней и задней поверхностей главных режущих кромок - не более $Ra = 0,32$ мкм; цилиндрической ча-

сти хвостовика, поверхностей вспомогательных режущих кромок и фасок - 0,63 мкм; прочих поверхностей - $Rz = 20$ мкм.

В качестве экспериментальных образцов для проведения исследований были выбраны трубы, изготовленные из композиционного материала с косой продольно-поперечной намоткой волокон (КППН), что обеспечивает физико-механические свойства, указанные в табл. 1.



Рис. 4. Режущий инструмент

Таблица 1

Физико-механические свойства материала

Свойство	В тангенциальном направлении	В осевом направлении
Предел прочности, Па	$4,6 \cdot 10^8$	$8,8 \cdot 10^8$
Модуль упругости при растяжении, Па	$3,43 \cdot 10^{10}$	$1,28 \cdot 10^{11}$
Плотность, кг/м ³	$1,97 \cdot 10^3$	

Экспериментальные исследования проводились с использованием методики планирования эксперимента (дробно-факторный эксперимент). Достаточность повторяемости опытов оценивалась по однородности дисперсий (критерий Кохрена). Рассчитывались коэффициенты размерной модели. Значимость коэффициентов модели оценивалась по критерию Стьюдента, адекватность модели реальному процессу - по критерию Фишера.

Варьируемыми параметрами приняты режимы резания: скорость резания V , м/мин, подача S , мм/зуб, и глубина фрезерования t , мм. В процессе экспериментов

контролировали следующие параметры: износ инструмента Δ , мкм, шероховатость обработанной поверхности Ra , мкм, и глубину дефектного слоя h , мкм. В табл. 2 представлена матрица планирования эксперимента [4].



Рис. 5. Настройка станка VMC8

Таблица 2
Матрица планирования
экспериментальных исследований

№	Варьируемые параметры		
	V , м/мин	S , мм/зуб	t , мм
1	-	-	+
2	-	+	-
3	+	+	+
4	+	-	-

Для определения интервалов варьирования факторов был проведен информационный поиск, а также серия предварительных экспериментов. Таким образом, интервал варьирования скорости резания - $V=63...200$ м/мин, подачи - $S=0,02...0,1$

мм/зуб, глубины фрезерования - $t=1...10$ мм. Нижние границы интервалов варьирования определяются минимальной производительностью, верхние – качеством обработанной поверхности [3].

Исследования проводились на фрезерном станке VMC850, оснащённом системой ЧПУ FANUC. Заготовка закреплялась на столе станка с помощью трёхкулачкового самоцентрирующегося патрона. Движение подачи реализовывалось путём винтовой интерполяции. Общий вид наладки станка представлен на рис. 5.

Для контроля температуры в зоне резания был использован инфракрасный термометр модели KIRAY 300 с разрешающей способностью $0,1$ °С. Контроль износа инструмента осуществлялся на инструментальном микроскопе с ценой деления $0,05$ мм.

Обсуждение результатов исследований

Результаты исследования зависимости температуры от режимов резания представлены в виде графиков на рис. 6.

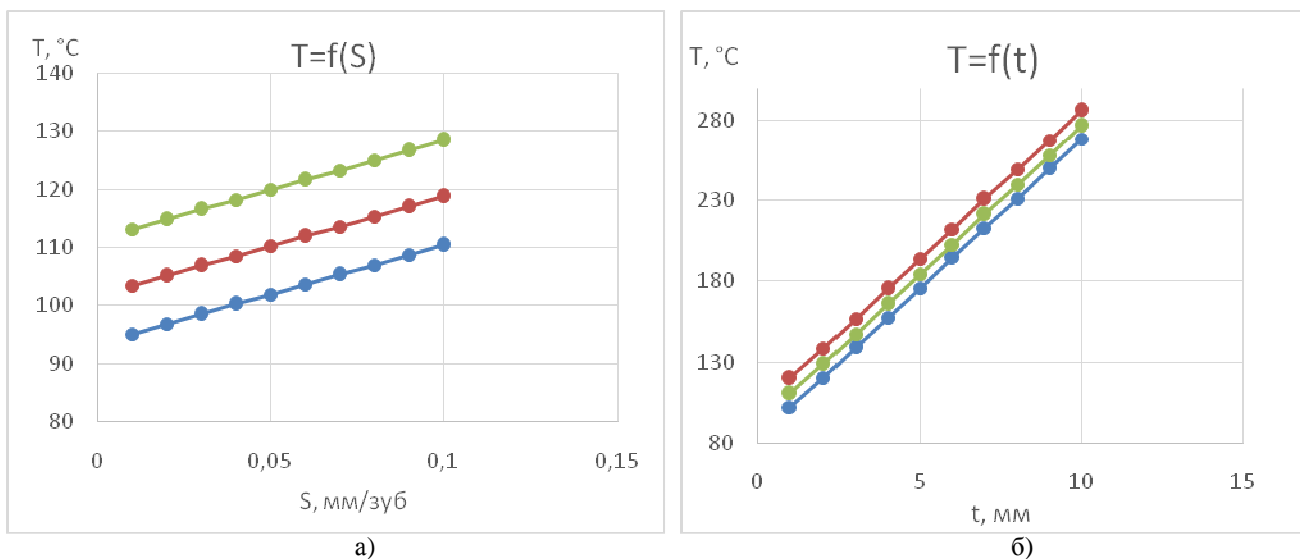


Рис. 6. Изменение температуры в зависимости от режимов резания)

а - от подачи (при $t=5$ мм);

б - от глубины резания (при $S=0,06$ мм/зуб)

Как видно из графиков, на рассматриваемом интервале времени механической обработки стеклопластика выявлена линейная связь между изменением температуры и режимными характеристиками, в

частности глубиной фрезерования t и подачей на зуб S .

Математическая обработка полученных экспериментальных данных позволила получить эмпирическую зависимость тем-

пературы от режимных характеристик | процесса фрезерования:

$$T = A + B(\tau),$$

где

$$A = -127,141 + 0,872416V + 1074,219S + 3,5926t;$$

$$B = -75,1027 + 0,304139V + 621,5419S + 4,467983t;$$

τ – время обработки, мин.

Результаты исследования зависимости износа инструмента по задней поверх-

ности от режимов резания представлены в виде графиков на рис. 7.

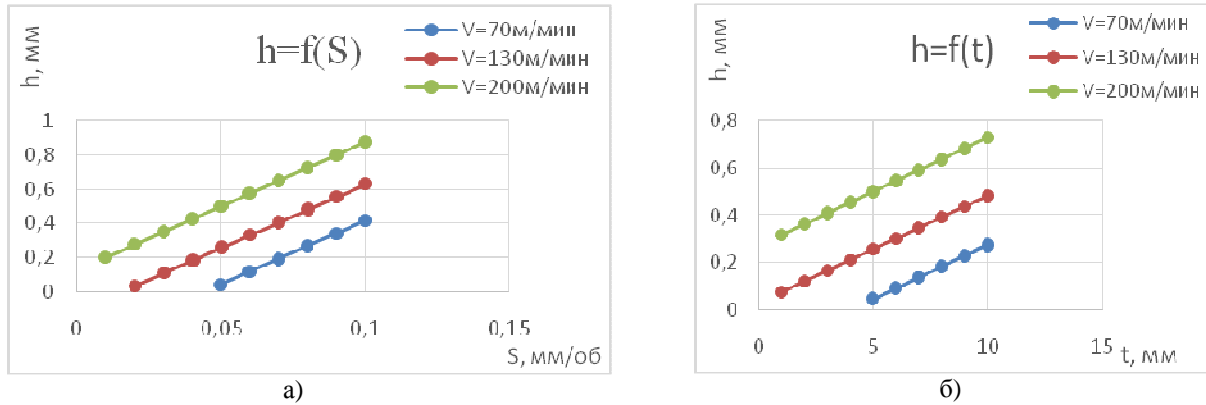


Рис. 7. Зависимость износа инструмента по задней поверхности от режимов резания: а - от подачи (при $t=5$ мм); б - от глубины резания (при $S=0,06$ мм/зуб)

Из графиков видно, что на рассматриваемом интервале времени механической обработки стеклопластика выявлена линейная связь между изменением износа по задней поверхности и режимными характеристиками, в частности глубиной фрезерования t и подачей на зуб S , причем

износ в большей степени зависит от подачи на зуб S .

Математическая обработка полученных экспериментальных данных позволила получить эмпирическую зависимость износа от режимных характеристик процесса фрезерования:

$$h = A + B(\tau),$$

где

$$A = -0,04506 + 0,000223V + 0,088125S + 0,006039t;$$

$$B = -0,115069 + 0,000656 V + 1,468125S + 0,007906t;$$

τ – время обработки, мин.

Для оценки качества обработанной поверхности необходимо знать распределение температурного поля по телу заготовки и инструмента. Это позволит прогнозировать появление прижогов, вели-

ну дефектного слоя, конструктивно-геометрические параметры, а также предупреждать преждевременный выход из строя режущего инструмента.

Заключение

При проектировании операций фрезерования стеклопластиков необходимо учитывать ряд особенностей, таких как низкая теплопроводность, абразивное воздействие наполнителя, разрушение структуры полимерного связующего при резании и упругие свойства материала. С уче-

том данных особенностей была предложена конструкция сборной фрезы, которая позволяет экспериментальным путем установить оптимальные геометрические параметры инструмента для достижения заданных выходных параметров фрезерования. На основе данных экспериментов по-

лучены зависимости, позволяющие оценить влияние режимных параметров на период стойкости режущего инструмента. При этом на температуру наибольшее влия-

ние оказывает глубина фрезерования, а на износ по задней поверхности – подача на зуб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайст, С.В. Исследование температуры при фрезеровании стеклопластика/С.В. Гайст, А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.А. Катаева, Е.Ю. Лапенков//Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – №3. – С. 123–127.
2. Катаева, С.А. Конструкции фрез для обработки стеклопластиков/ С.А. Катаева, С.В. Гайст, А.М. Марков, П.О. Черданцев, Е.Ю. Лапенков// Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – №3. – С. 307–312.
3. Лапенков, Е.Ю. Классификация способов управления показателями точности при обработке стеклопластиков/ Е.Ю. Лапенков, А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.А. Катаева, С.В. Гайст//Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – №3. – С. 93–99.
4. Мозговой, Н.И. Стеклопластик и особенности его механической обработки. Все о стеклопластиках / Н.И. Мозговой, А.М.Марков, М.Б. Доц. - Saarbrücken, 2012. - С. 98.
5. Доц, М.Б. Проектирование технологических операций обработки композиционных материалов на основе искусственных нейронных сетей// М.В. Доц, Е.Б. Бондарь, А.М. Марков, В.Б. Маркин //Ползуновский вестник. – 2012.– № 1-1.– С. 81-84.
6. Мозговой, Н.И. Проектирование операций изготовления отверстий в деталях из стеклопластика// Н.И. Мозговой, А.М. Марков, Я.Г. Мозговая //Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).– 2012.– № 1.– С. 45–49.
7. Марков, А.М. Методика исследования износа инструмента на операциях фрезерования стеклопластиков/ А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, О.А. Барсукова // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014.–№1.– С. 193–197.
8. Марков, А.М. Экспериментальные исследования фрезерования композиционных материалов / А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, С.А. Катаева // Инновации в машиностроении: сб. тр. VII междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В. Ю. Блюменштейна. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – С. 99–104.
9. Марков, А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов / А.М. Марков // Научные технологии в машиностроении. - 2014. - № 7 (37). - С. 3-8.
1. Gaist, S.V. Investigation of temperature at glass-fiber material milling/S.V. Gaist, A.M. Markov, P.O. Cherdantsev, S.A. Katayeva, E.Yu. Lapenkov//*Urgent Problems in Mechanical Engineering*. – 2016. – №3. – pp. 123–127.
2. Katayeva, S.A. Design of mills for glass-fiber working/ S.A. Katayeva, S.V. Gaist, A.M. Markov, P.O. Cherdantsev, E.Yu. Lapenkov// *Urgent Problems in Mechanical Engineering*. – 2016. – №3. – pp. 307–312.
3. Lapenkov, E.Yu. Classification of methods for accuracy control during glass-fiber working/ E.Yu. Lapenkov, A.M. Markov, P.O. Cherdantsev, S.A. Katayeva, S.V. Gaist//*Urgent Problems in Mechanical Engineering*. – 2016. – №3. – pp. 93–99.
4. Mozgovoy, N.I. *Glass-fiber and Peculiarities of its Machining. All about Glass-fiber Materials/* N.I. Mozgovoy, A.M.Markov, M.B. Dots. - Saarbrueken, 2012. - pp. 98.
5. Dots, M.B. Technological operations development for composite materials machining based on artificial neuronal networks// M.V. Dots, E.B. Bondar, A.M. Markov, V.B. Markin //*Polzunovsky Bulletin*. – 2012.– № 1-1.– pp. 81-84.
6. Mozgovoy, N.I. Design of operations for manufacturing holes in glass-fiber parts // N.I. Mozgovoy, A.M. Markov, Ya.G. Mozgovoy //*Metal Working (Technology, Equipment, Tools)*.– 2012.– № 1.– pp. 45–49.
7. Markov, A.M. Procedure of investigation of tool wear at glass-fiber milling/ A.M. Markov, P.O. Cherdantsev, S.V. Gaist, O.A. Barsukova // *Urgent Problems in Mechanical Engineering*. – 2014.– № 1.– pp. 193–197.
8. Markov, A.M. Experimental investigations of composite materials milling / A.M. Markov, P.O. Cherdantsev, S.V. Gaist, S.A. Katayeva // *Innovations in Mechanical Engineering: Proceedings of the VII-th Inter. Scientific-Pract. Conf.* / under the editorship of V.Yu. Blumenstein. – Кемерово: KuzSTU, 2015. – pp. 99–104.
9. Markov, A.M. Technological peculiarities composite parts machining / A.M. Markov // *High Technologies in Mechanical Engineering*. - 2014. - № 7 (37). - pp. 3-8.

Статья поступила в редколлегию 22.06.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор Алтайского государственного аграрного университета
Ишков А.В.

Сведения об авторах:

Гайст Сергей Валерьевич, аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, e-mail: sergei_gaist@mail.ru.

Катаева Софья Анатольевна, магистрант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, e-mail: Kataeva.Sof@gmail.com.

Марков Андрей Михайлович, д.т.н., профессор Алтайского государственного технического уни-

Gaist Sergey Valerievich, post graduate student of Polzunov State Technical University of Altai, e-mail: sergei_gaist@mail.ru.

Katayeva Sophia Anatolievna, competitor for Master's Degree of Polzunov State Technical University of Altai, e-mail: Kataeva.Sof@gmail.com.

Markov Andrey Mikhailovich, D.Eng., Prof. of Polzunov State Technical University of Altai, e-mail: andmarkov@inbox.ru.

верситета им. И.И. Ползунова, e-mail: andmarkov@inbox.ru.

Черданцев Павел Олегович, к.т.н., доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, e-mail: p004092@yandex.ru.

Лапенков Евгений Юрьевич, магистрант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, e-mail: ewgenii018@mail.ru.

Cherdantsev Pavel Olegovich, Can.Eng. of Polzunov State Technical University of Altai, e-mail: p004092@yandex.ru.

Lapenkov Evgeny Yurievich, competitor for Master's Degree of Polzunov State Technical University of Altai, e-mail: ewgenii018@mail.ru.