

М.Ю. Петухов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ ПРИЧИН ОТКАЗА ДИФФЕРЕНЦИАЛА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ – ИСТОРИЯ НЕСКОЛЬКИХ ЭКСПЕРТИЗ

Исследованы причины отказов дифференциалов легковых автомобилей, связанные с разрушением оси сателлитов. Возникновение рассмотренных дефектов обусловлено нарушением условий эксплуатации автомобиля. Приведена методика определения нормальных условий эксплуатации при установлении причин отказов дифференциалов.

Ключевые слова: дифференциал, разрушение, отказ, нормальные условия эксплуатации.

Межколесный дифференциал является высоконадежным узлом легкового автомобиля. Это подтверждается не только статистикой отказов, но и тем фактом, что в современных руководствах по ремонту автомобилей технологии ремонта данного узла встречаются крайне редко. В них в лучшем случае найдется лишь технология замены резиновых армированных уплотнительных колец (иногда их называют сальниками). Тем не менее разрушение дифференциала при эксплуатации автомобиля не такая уж редкость. Поскольку современный массовый автомобиль – это переднеприводный автомобиль, поломка дифференциала практически всегда приводит к отказу всей коробки передач. Стоимость коробки передач автомобиля импортного производства гольф-класса достаточно высока и часто достигает одной трети суммы, с которой начинается продажа такого автомобиля.

При технической экспертизе отказов узлов и агрегатов автомобиля обычно используется следующий порядок исследования:

- устанавливается техническое состояние деталей;
- исследуются причины повреждения разрушенных элементов;
- определяется причинно-следственная связь между разрушенными деталями и последствиями, наступившими в результате повреждения;
- делаются выводы о причинах отказа.

В практически безотказном дифференциале современного автомобиля наиболее часто повреждается ось сателлитов. О том, как это происходит – три истории.

История первая

На рис. 1 представлена ось сателлитов автомобиля Ford Focus ST (автомобиль из Германии), имеющая характерные повреждения тех мест, где вращаются сателлиты. Расположение отверстия под фиксирующий штифт и оставшиеся фрагменты от лысок на оси позволяют понять, что наибольший износ произошел именно там, где действуют нормальные силы, обеспечивающие функционирование дифференциала при вращении сателлитов с большой скоростью. Это подтверждается цветами побежалости на изношенной поверхности оси и проплавлением металла с его переносом и следами схватывания, что хорошо видно на рис. 2. По причине износа возникла необходимость измерить твердость материала оси – как ее сердцевины (рис. 3), так и поверхностного слоя.



Рис. 1. Ось сателлитов дифференциала автомобиля Ford Focus ST.
Пробег 9400 км



Рис. 2. Часть изношенной оси сателлитов



Рис. 3. Следы от измерения твердости, а также участок долома с более светлым упрочненным слоем

Результаты измерения твердости свидетельствуют о том, что твердость поверхностного слоя составляет 64–68 HRC; твердость при большей глубине вдавливания индентора составила 58 HRC. Такой вы-

сокий уровень твердости, соответствующий твердости закаленной высоко- и среднеуглеродистой стали, однозначно свидетельствует о том, что на детали «ось сателлитов» в процессе ее изготовления было проведено упрочнение поверхностного слоя.

Твердость сердцевины детали составляет 32–35 HRC, что соответствует твердости закаленной и высокоотпущенной среднеуглеродистой стали. Дополнительно, с целью показать наличие упрочненного слоя на поверхности детали, деталь была надрезана, а затем доломана. Общий вид детали представлен на рис. 3. На поверхности излома четко виден кольцеобразный, более светлый упрочненный слой глубиной 1,0–2,0 мм. Металлографическое исследование показало, что все требования [1, 2], обычно применимые к подобным деталям, учтены.

В ходе исследования также было установлено, что незадолго до отказа коробки передач был заменен приводной вал одного из передних колес. Причина – разрушение шарнира равных угловых скоростей. Начали исследовать шины (Goodyear Excellence, Treadwear 240) и установили, что шины передних колес имеют больший износ, чем задних. Измерение остаточной глубины протектора колес в соответствии с методикой, предусмотренной стандартом [3], показало, что износ колес достаточно равномерный. Остаточная глубина протектора задних колес составляет 10,0–10,5 мм. Остаточная глубина протектора переднего левого колеса составляет 7,5–8,0 мм, а переднего правого – 8,5–9,0 мм.

Тщательный осмотр шин показал, что они имеют ряд особенностей. Так, например, шины задних колес имеют небольшие участки беговой поверхности с трассами, расположенными в поперечном направлению автомобиля направлении. Эта особенность указывает на то, что владелец автомобиля часто использовал маневр *поворот (разворот) автомобиля с использованием стояночного тормоза*, т.е. поворот с заблокированными задними колесами.

Шины передних колес также имеют существенные признаки экстремального вождения автомобиля – это вырыв части материала беговой дорожки шин. Размер повреждений иногда значительный – 1,5×1,5 см. Дефект проявляется в большей степени на левом колесе, чем на правом. На задних колесах дефект не проявляется вовсе. Помимо данного дефекта имеется больший износ шин передних колес в плечевой зоне.

История вторая

Автомобиль Mazda 3 с пробегом 4800 км. Коробка передач аналогичная, несмотря на то, что автомобиль из Японии, также имеет повреждения. Ось сателлитов дифференциала после износа, достигающего половины диаметра, не выдержала и сломалась (рис. 4).



Рис. 4. Ось сателлитов дифференциала автомобиля Mazda 3.
Пробег 4800 км

Поэтому первым этапом исследования было установление причин разрушения оси сателлитов. Оценка твердости детали показала, что на поверхности всех трех фрагментов твердость высокая: 53–56 HRC. В сердцевине твердость значительно ниже: 33–37 HRC. Таким образом, поверхность детали при изготовлении была скорее всего подвергнута термической обработке. По материалу оси все точно так же, как и в истории первой.

По приводным валам все аналогично – примерно за неделю до отказа коробки по гарантии поменяли приводной вал в сборе. Причина – разрушение шарнира равных угловых скоростей.

Износ шин (Bridgestone Potenza RE040, Treadwear 140) также разный, передние изношены в большей степени. Износ в целом больше, чем в первом случае, но и износостойкость шин ниже: для шин задних колес – 6,8–7,1 мм, для шин передних колес – 4,1–4,6 мм.

Шины передних колес имеют наибольший износ наружной плечевой зоны, что свидетельствует о движении колес автомобиля в поперечном направлении качения колес, т.е. при заносе. На заднем правом колесе обнаружен неравномерный по беговой дорожке дефект плечевой зоны, указывающий на износ при заторможенном колесе, – дефект, образующийся при развороте или повороте с заносом задней оси с использованием ручного, т.е. стояночного, тормоза.

Особенность повреждения оси сателлитов в рассмотренных случаях позволяет сделать следующий вывод о механизме разрушения

дифференциалов: повышение разности угловых скоростей колес левой и правой стороны приводит к увеличению относительной скорости вращения сателлитов на их оси. На первом этапе ухудшаются условия смазки сателлитов, поскольку предусмотренная традиционная организация смазки с использованием выполненных на оси лысок становится неэффективной. На втором этапе происходит постепенный нагрев рабочей поверхности, появляются задиры, что дополнительно ухудшает условия смазки и повышает температуру. При увеличении температуры выше температуры отпуска твердость поверхностного слоя оси снижается, что приводит к интенсивному износу рабочей поверхности. На третьем этапе появляются дефекты, следствием чего является нарушение взаимного расположения деталей дифференциала, что приводит к их поломке. Обычно это происходит в момент реверса – смены переднего хода на задний или наоборот. При доведении износа оси до предельного состояния она ломается под действием сил, что также приводит к поломке, выпадению шестерен их корпуса дифференциала и повреждению картера коробки передач.

История третья

Эта история несколько отличается от двух предыдущих. Автомобиль Ford Focus российской сборки проехал 17 500 км до поломки коробки передач, т.е. намного больше, чем два предыдущих участника. Владелец автомобиля увлекается дрифтом.

Вообще переднеприводные автомобили вследствие особенностей привода на колеса не могут участвовать в профессиональных соревнованиях по дрифту. Но попытка сделать что-то подобное дрифту для них существует. Главное условие – это предельный по условиям движения автомобиля момент на колесах, обеспечивающий возможность сноса передней оси из-за потери сцепления колес с дорогой, а также интенсивная работа стояночным тормозом для блокировки задних колес, что инициирует занос. Дефекты, свойственные такому управлению, присутствуют на колесах всех трех автомобилей.

В третьей истории официальные представители отказались менять коробку передач по гарантии. Дело по данному вопросу было направлено в суд. Нашлись эксперты, которые написали, что неисправность коробки возникла в результате производственного недостатка дифференциала как сборочной единицы. Другой эксперт сделал заявление о том, что поломка оси сателлитов – это известный недостаток дифференциалов автомобилей Ford.

Попробуем разобраться с третьей историей. Детали дифференциала, поступившие на исследование, показаны на рис. 5. На фрагменте корпуса дифференциала (рис. 6) отверстие для оси сателлита получилось эллиптическим. Ось эллипса вытянута в направлении стрелок, по центру отверстия виден срезанный фиксирующий штифт, а в глубине отверстия виден уступ.

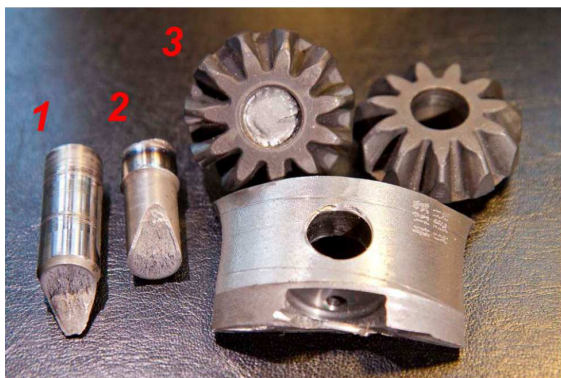


Рис. 5. Переданные на исследование детали (цифрами обозначены фрагменты оси сателлитов)

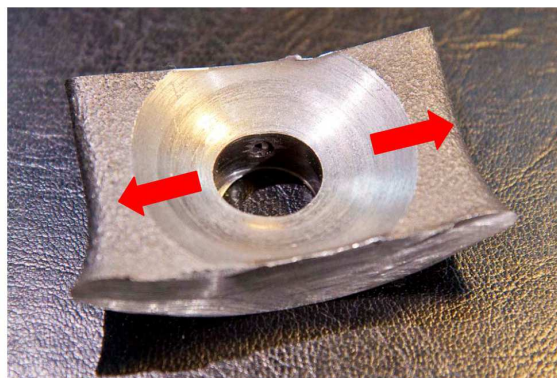


Рис. 6. Выпиленная часть корпуса дифференциала

Другая часть, как и подобает срезанному штифту, располагается в ответной детали – оси сателлитов. Эта часть оси сварена с сателлитом (рис. 7), с обратной стороны наблюдается излом (рис. 8). Внутри отверстия наблюдается срезанный фиксирующий штифт. По комплексу показателей (линии усталости, хрупкий узор и зона долома) излом относится к усталостному, причем характерному для изгиба валов [4].

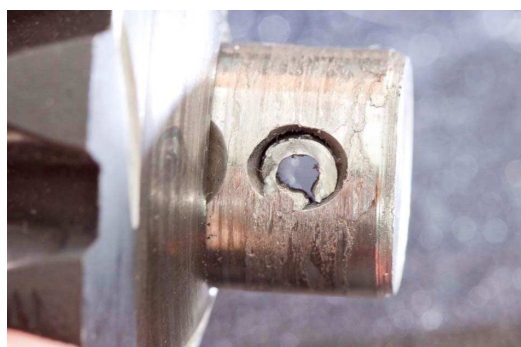


Рис. 7. Фрагмент 3 по рис. 5. На части оси, установленной в корпус дифференциала, следы схватывания и переноса части металла



Рис. 8. Излом оси характерен для усталостного разрушения

На фрагменте 2 имеются цвета побежалости (рис. 9), свидетельствующие о высокой температуре нагрева. Голубой цвет соответствует нагреву примерно до 350 °С, бронзовый цвет – примерно до 270 °С. Оставшаяся часть оси сателлитов (рис. 10) имеет следы схватывания, дефекты рабочей поверхности как в месте установки оси в корпус дифференциала – зона 1, так и в месте установки сателлита – зона 2. Дефекты поверхности – износ, глубокие задиры, перенос металла, следы схватывания.

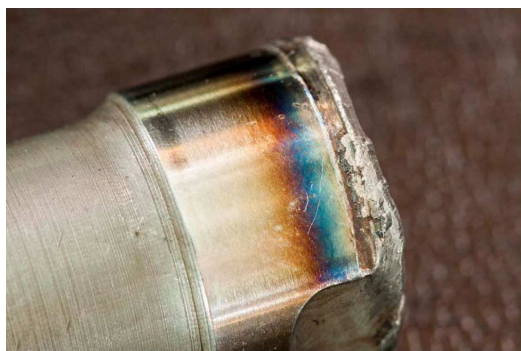


Рис. 9. Фрагмент 2. Цвета побежалости металла свидетельствуют о высокой температуре нагрева



Рис. 10. Фрагмент 1 оси сателлитов имеет следы схватывания и переноса части металла. Зона 1 – место расположения оси в корпусе дифференциала, зона 2 – место расположения сателлита

Ось сателлитов состоит из трех фрагментов, показанных на рис. 5. На рис. 11 показано совмещение двух фрагментов оси сателлитов. Излом оси характерен для изгибающих предельных нагрузок и, в свою очередь, имеет некоторые особенности. Трещина зародилась у концентратора напряжений – галтели (см. рис. 11) – и росла перпендикулярно напряжениям. Излом в сердцевине вязкий, четко наблюдается различная структура его поверхности. На части поверхности излома, на глубине примерно 1,0 мм, виден блестящий светлый кристаллический излом с ручьистым строением. Данная особенность позволяет говорить о выполненной термообработке оси, связанной с поверхностным упрочнением поверхности, как того требует конструкторская документация.

В результате проведенного исследования было установлено, что разрушение дифференциала было продолжительным по времени. На это обстоятельство указывает излом оси у сателлита, который образовался в результате усталостного разрушения (рис. 12). Излом оси имеет явно выраженный пояс толщиной, равной примерно 1 мм, свидетельствующий о выполненной термообработке поверхности. Усталостное

разрушение обусловлено цикличностью нагрузки, т.е. является продолжительным по времени, а значит, неодномоментным. Особенность излома – храповый узор на периферии, который характерен для вала, а не для оси. Это обстоятельство означает, что с момента начала зарождения на поверхности оси усталостных трещин она являлась валом, т.е. к этому моменту фиксация оси от вращения отсутствовала, а значит, фиксирующий штифт был уже срезан. Срез фиксирующего штифта произошел при вращении оси сателлитов.



Рис. 11. Совмещение фрагментов оси сателлитов. Фрагмент 1 слева, фрагмент 2 справа



Рис. 12. Излом оси

После сваривания деталей сателлита и оси сателлитов узел стал неразборным. Ось сателлитов превратилась в вал, который фиксировался от продольного перемещения приваренным сателлитом. Геометрия шестерен в дифференциале давала возможность воздействия силы только в направлении вращения корпуса дифференциала. Поскольку корпус дифференциала изготовлен из более мягкого материала чугуна по сравнению со стальной термообработанной поверхностью оси сателлитов, износ отверстия происходил в большей степени. Из-за направления сил отверстие стало эллиптической формы. Направление большего диаметра эллипса совпадает с направлением действия сил, а разная величина износа определяется направлением движения автомобиля. Износ в прямом направлении больше, чем при движении задним ходом, поэтому наблюдается разная величина уступов в отверстии по рис. 6.

Работа дифференциала по указанной схеме происходила продолжительное время. В течение этого времени между фрагментами 2 и 3 оси сателлитов развивались усталостные процессы. Усталостные тре-

щины росли и останавливались. Так продолжалось до тех пор, пока оставшееся сечение (зона долома) могло выдерживать нагрузки. В момент разрушения оси сателлитов в месте между фрагментами 2 и 3 оси произошло разделение ее на два фрагмента. Один фрагмент (№ 3) остался в дифференциале, другой под действием центробежных сил стал перемещаться наружу из корпуса дифференциала. При таком перемещении пока еще целый фрагмент встретил на своем пути внутреннюю поверхность картера коробки и пробороздил ее, после чего, не выдержав нагрузок, сломался.

Таким образом, причиной разрушения дифференциала изначально явилось возникновение при его работе процесса, напоминающего сварку трением. Параметры этого процесса, в частности частота вращения сателлита на оси, многократно превышают параметры вращения при нормальной эксплуатации автомобиля.

На этом следует остановиться и сделать паузу. Статья 476 части 2 Гражданского кодекса РФ фактически предусматривает презумпцию виновности продавца, поскольку «в отношении товара, на который продавцом предоставлена гарантия качества, продавец отвечает за недостатки товара, если не докажет, что недостатки товара возникли после его передачи покупателю вследствие нарушения покупателем правил пользования товаром или его хранения, либо действий третьих лиц, либо непреодолимой силы».

Как правило, в руководстве по эксплуатации автомобиля редко содержатся, точнее, совсем не содержатся сведения о недопустимости буксования ведущих колес автомобиля. Даже для автомобилей повышенной проходимости в руководстве по эксплуатации можно встретить такую фразу: «Избегайте интенсивного буксования ведущих колес. Колеса могут глубоко погрузиться в грунт, и автомобиль будет трудно освободить». И ни одного слова о возможном повреждении дифференциала, поэтому доказать, что покупатель нарушил правила пользования автомобилем чрезвычайно сложно.

В этой связи предлагается следующая методика, позволяющая определить нормальные условия эксплуатации автомобиля, в частности дифференциала, и тем самым решить вопрос о нарушении или ненарушении покупателем правил пользования автомобилем.

Известно, что автомобиль Ford Focus относится к категории транспортных средств М1 и предназначен для движения по дорогам

общего пользования. Известно, что дифференциал автомобиля предназначен для возможности вращения колес с разной угловой скоростью, что обычно требуется при движении в повороте или по неровной дороге. Известно также, что при движении водитель автомобиля должен руководствоваться Правилами дорожного движения, которые в п. 10.1 указывают, что «скорость транспортного средства не должна превышать установленного ограничения», а также «должна обеспечивать водителю возможность постоянного контроля над движением транспортного средства для выполнения требований Правил».

В автотехнической экспертизе при анализе и реконструкции механизмов возникновения дорожно-транспортных происшествий используется понятие критической скорости движения автомобиля в повороте при отсутствии поперечного скольжения [5]. Значение критической скорости используется для оценки правильности выбора водителем скорости автомобиля при движении на повороте:

$$v_k = \sqrt{127R\phi_y},$$

где R – радиус поворота, м; ϕ_y – коэффициент сцепления колес в поперечном направлении. Коэффициент сцепления в поперечном направлении для сухого асфальтобетонного покрытия зависит от многих факторов, и его для условия отсутствия продольных сил можно выбрать на уровне 0,7. Расчет критической скорости приведен в табл. 1. Радиус поворота автомобиля выбран в диапазоне от минимально возможного по технической характеристике автомобиля до предельного, определяемого скоростью, разрешенной Правилами дорожного движения.

Таблица 1

Расчет критической скорости движения автомобиля в повороте

Параметры	Ед. изм.	Значение			
Радиус кривой	м	5,00	45,00	85,00	125,00
Скорость автомобиля	км/ч	21,02	63,07	86,68	105,11
Скорость автомобиля	м/с	5,84	17,52	24,08	29,20

Поскольку внешнее колесо движется по большему радиусу, а внутреннее по меньшему, значение линейной скорости колеса зависит от колеи автомобиля. Для автомобиля Ford Focus колея передних колес состав-

ляет 1,535 мм, поэтому радиус качения внешнего колеса составит величину больше среднего радиуса на половину колеи передних колес, а внутреннего колеса – на половину от колеи меньше среднего радиуса поворота. Значение линейных скоростей определится из пропорции.

С учетом известного соотношения угловых и линейных скоростей $v = \omega r_k$ для колеса размером 195/65 R15 (радиус качения $r_k = 0,32$ м) получим частоты вращения колес. Результаты вычислений поместим в табл. 2.

Таблица 2

Расчет частот вращения колес при критической скорости движения автомобиля в повороте

Параметры	Ед. изм.	Значение			
Радиус кривой внешнего колеса	м	5,77	45,77	85,77	125,77
Радиус кривой внутреннего колеса	м	4,23	44,23	84,23	124,23
Скорость вращения внешнего колеса (линейная)	м/с	6,74	17,82	24,30	29,38
Скорость вращения внутреннего колеса (линейная)	м/с	4,94	17,22	23,86	29,02
Частота вращения внешнего колеса	об/мин	201	532	725	877
Частота вращения внутреннего колеса	об/мин	148	514	712	866
Разность частот вращения колес	об/мин	53	18	13	11

В результате расчетов установлено, что разность частот вращения внешнего и внутреннего колеса автомобиля составляет величину чуть более 50 об/мин. Передаточное число пары сателлит – полуосевая шестерня равно 1,45. Данное обстоятельство означает, что разность угловых скоростей сателлитов дифференциала составляет $53 \cdot 1,45 = 76,8$ об/мин при движении автомобиля с критической скоростью на кривой радиусом 5 м. Поскольку сателлиты вращаются на неподвижной оси и их направление вращения противоположно друг другу, каждый из сателлитов вращается относительно своей оси со скоростью 38,4 об/мин для рассматриваемого случая.

Таким образом, условия нормальной эксплуатации автомобиля приводят к скорости вращения сателлитов относительно своей оси, не превышающей 40 об/мин. Это значение является максимально допустимым при нормальной эксплуатации. При снижении коэффициента сцепления колес значение скорости вращения сателлитов на своей оси будет снижаться.

Непредусмотренное конструкцией дифференциала вращение оси сателлитов стало возможным только по причине сваривания одного из сателлитов дифференциала с самой осью сателлитов. Как следует из рассмотрения особенностей функционирования дифференциала, процесс сваривания указанных деталей должен быть подобен технологическому процессу сварки трением. Частота вращения сателлита на оси сателлитов для обеспечения свариваемости деталей должна быть значительно выше частоты вращения, достижимой при нормальной эксплуатации автомобиля. Для качественной сварки трением необходимо обеспечить относительную скорость 10–25 об/с и высокое удельное давление до 200 МПа [6]. Следовательно, образование сварного соединения в паре сателлит – ось сателлита обусловлено превышением значений угловой скорости вращения оси сателлитов, свойственных нормальной эксплуатации автомобиля.

Таким образом, причины разрушения дифференциала и, следовательно, коробки передач обусловлены реализацией водителем режимов движения автомобиля, не свойственных его нормальной эксплуатации. В связи с этим неисправность коробки передач носит эксплуатационный характер.

Список литературы

1. Гришкевич А.И. Проектирование трансмиссий автомобиля. – М.: Машиностроение, 1984.
2. Яскевич З. Ведущие мосты. – М.: Машиностроение, 1985.
3. ГОСТ Р 51709–2001. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки. – М.: Изд-во стандартов, 2001.
4. Фрактография и атлас фрактограмм: справ. издание / под ред. Дж. Феллоуза. – М.: Металлургия, 1982.
5. Судебная автотехническая экспертиза. – Ч. II. – М.: Изд-во ВНИИСЭ, 1980.
6. Сварка. Резка. Контроль: справочник: в 2 т. / под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – Т. 1.

Получено 6.03.2013

M.Yu. Petukhov

**DETERMINATION OF NORMAL OPERATING CONDITIONS
AT THE ESTABLISHED CAUSES OF DIFFERENTIAL GEARS
FAILURES – THE HISTORY OF MULTIPLE EXPERTISE**

The causes of failure of the differential gears of cars associated with the destruction of the axis of the satellites. The emergence of the considered defects due to violation of the conditions of the car. The technique of determining the normal operating conditions in establishing the causes of failures of differential gears.

Keywords: differential gears, destruction, failure, normal operating conditions.

***Петухов Михаил Юрьевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: pmu@pstu.ru).*

***Petukhov Mikhail Yurjevich** (Perm, Russia) – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russia, e-mail: pmu@pstu.ru).*