

УДК 621.891; 669.131
DOI: 10.12737/22016

С.Г. Бишутин, А.Г. Суслов, В.И. Сакало

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ШЛИФОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПАР ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассмотрена взаимосвязь режимов финишного шлифования поверхностей трения деталей с особенностями пластической деформации и разрушения их тонких поверхностных слоев при изнашивании. Показано, что условия проведения финишной абразивной обработки существенно влияют на дальнейшее поведение поверхностного слоя

в ходе деформации при трении, что во многом определяет его износостойкость.

Ключевые слова: износостойкость поверхности, качество поверхности, финишное шлифование, структурообразование поверхностного слоя, внешнее трение.

Bishutin, A.G. Suslov, V.I. Sakalo

STRUCTURE FORMATION IN SURFACE LAYERS OF GROUND PARTS IN FRICTION COUPLES DURING THEIR OPERATION

A surface layer in deformable material is an independent structural level of deformation which plays a significant functional role in a part behavior at the operation of this part. It is conditioned on not only by a certain influence of a surface layer state upon performance of a part, but also by peculiarities of its deformation.

The surface layer deformation gains special significance during friction of mating ground parts. At friction the basic changes of material take place in a thin (up to some micrometers) in a surface layer. The localization of stresses and their pulse character at friction results in the generation of deformation defects. These defects arising on the surface move then to a certain depth conditioning the development of plastic deformation. The structure and properties of a deformed layer are defined by an initial state of material,

conditions of loading, temperature and environment in which a couple of friction operates.

The experimental investigations carried out of the surface layer formation in parts ground revealed various mechanisms of their behavior at friction affecting substantially the wear resistance of parts in couples of friction.

The investigation results allow choosing substantiated scientifically the conditions and modes for finishing friction surfaces ensuring the formation of wear resistant thin near-surface structures that will increase considerably machinery life and efficiency of technological operations of their finish grinding.

Key words: surface wear resistance, surface quality, abrasive finishing, structure formation of surface layer, external friction.

Поверхностный слой в деформируемом материале является самостоятельным мезоскопическим структурным уровнем деформации, который играет важную роль в механическом поведении твердого тела [1]. Деформирование поверхностных слоев приобретает особое значение в процессах, связанных с контактированием сопряженных поверхностей. Именно поверхностный слой определяет поведение системы трения и процесс изнашивания [2]. В исследованиях [3] отмечается, что предварительная обработка материала способна существенно влиять на износостойкость поверхности. Однако при этом недостаточно

внимания уделяется научно обоснованному выбору условий и режимов абразивной обработки поверхностей трения. Абразивная обработка – финишный этап большинства технологических процессов изготовления ответственных деталей машин, и грамотный выбор условий её проведения является существенным резервом повышения износостойкости поверхностей трения [4; 5]. Для этого необходимо изучить взаимосвязь режимов финишной абразивной обработки поверхностей трения деталей с особенностями пластической деформации и разрушения их тонких поверхностных слоев при изнашивании.

Обработанная поверхность внешними факторами процесса абразивной обработки (термическим и силовым) переводится в неравновесное состояние. В процессе трения материал детали в микроконтактах поверхностных слоев стремится к более равновесному состоянию благодаря наличию значительной доли дефектной фазы, сформированной при финишной абразивной обработке. Очевидно, что процесс перехода материала из неравновесного состояния (после абразивной обработки) в более равновесное (в процессе трения) в основном и определяет влияние режимов финишной абразивной обработки на деформирование и разрушение поверхностных слоев при изнашивании. Для подтверждения этого были проведены эксперименты. В ходе экспериментов стальные образцы обрабатывались на различных технологических режимах и затем подвергались триботехническим испытаниям.

Режимы и условия абразивной обработки варьировались таким образом, чтобы изменялось термическое и силовое воздействие на образцы и, как следствие этого, формировалось различное напряженно-деформированное состояние их поверхностных слоев. Уровни варьирования режимов обработки определялись с учетом результатов исследований [4-6] так, чтобы

отсутствовали прижоги на поверхностях трения, которые существенно снижают эксплуатационные показатели.

Условия трения (нагрузка, скорость скольжения и смазочный материал) для всех образцов были одинаковы, причем нагрузка на образцы выбиралась с учетом исследований [7] для отсутствия заедания и реализации первоначального пластически насыщенного контакта, характерного для тяжело нагруженных узлов трения. Более подробно условия проведения испытаний описаны в [4; 6].

Далее на микрошлифах изучались тонкие приповерхностные структуры. Изучение микрошлифов проводилось с помощью оптической микроскопии (микроскоп «LEICA DMIRM»).

Результаты исследований показали, что наблюдаются отличия процессов деформирования и разрушения при трении поверхностных слоев образцов, обработанных в различных условиях абразивной обработки.

Поверхностный слой после финишной абразивной обработки имеет толщину до 15...20 мкм и на глубине до 5...7 мкм представляет собой мелкодисперсную структуру с хаотичной ориентацией зеренных блоков (рис. 1).

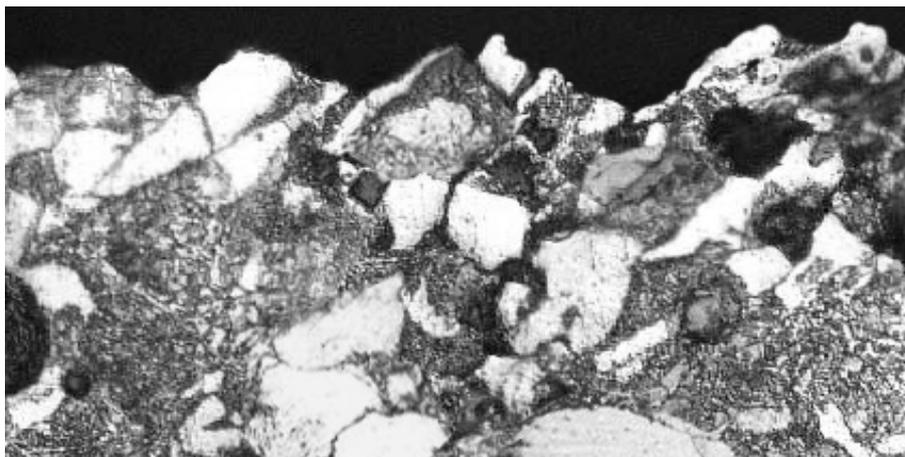


Рис. 1. Зеренные блоки приповерхностного слоя среднеуглеродистой стали после шлифования ($\times 2000$)

Толщина поверхностного слоя и размеры зеренных блоков зависят от режимов обработки. При повышении производительности абразивной обработки струк-

турно-фазовые изменения наблюдаются на большей глубине от поверхности.

При трении поверхностные зерна дробятся и вытягиваются в направлении вектора скорости скольжения (рис. 2). У

закаленных образцов существенной деформации поверхностных структур в ука-

занном направлении не наблюдалось.

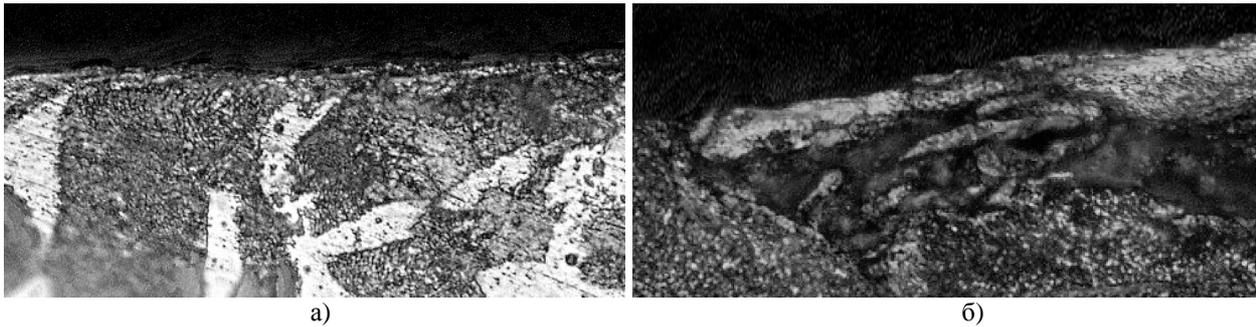


Рис. 2. Сдвиг поверхностных слоев образца из стали 45 (НВ 200...220) в процессе трения:
а – $\times 500$; б – $\times 2000$

Поверхностные слои образцов, подвергнутых обработке с глубиной резания более 16 мкм и без выхаживания, разрушались путем отслаивания фрагментов материала образца с поверхности (рис. 3), что приводило к более интенсивному изнашиванию. Причина такого разрушения заключается в разной степени деформации поверхностного слоя и основы. Абразивная обработка и процесс трения суще-

ственно изменяют структуру приповерхностных слоев, которые получают более высокую микротвердость, формируя, таким образом, концентратор напряжений. Он и обуславливает отслаивание приповерхностных слоев. Особенно ярко это проявляется в нержавеющей стали (рис. 4), у которой может отслаиваться сразу несколько приповерхностных слоев.

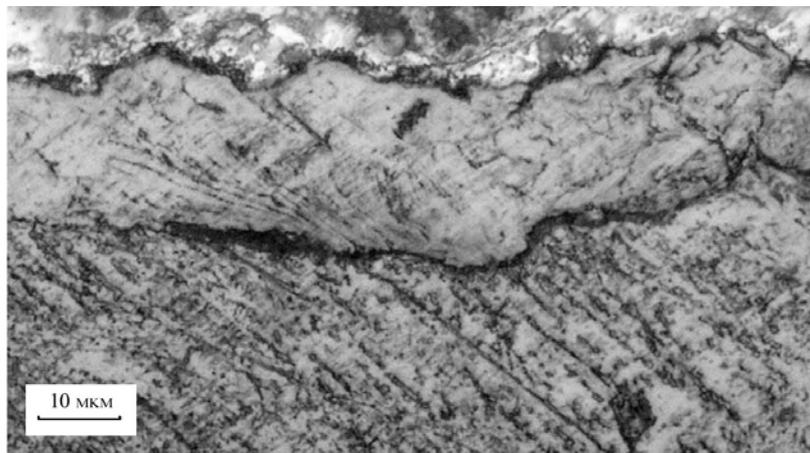


Рис. 3. Отслаивание при трении приповерхностного слоя образца из стали 45 (НВ 200...220)

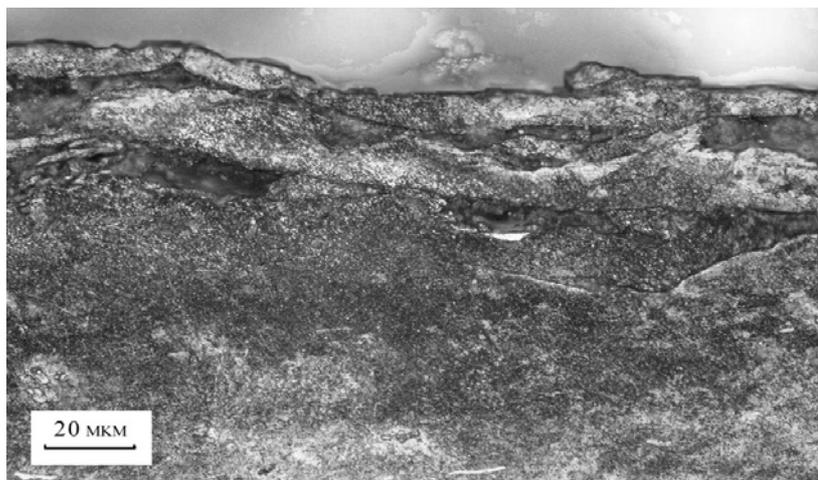


Рис. 4. Отслаивание при трении приповерхностных слоев образца из стали 12X18H10T (НВ 190...210)

Иная картина деформирования и разрушения наблюдается у поверхностных слоев, сформированных на щадящих режимах обработки (глубина резания до 8 мкм с последующим выхаживанием поверхности). В этом случае в поверхностных слоях незакаленных сталей при трении наблюдается ротационное деформирование, нередко сопровождающееся вихревым пластическим течением материала (рис. 5). Вихревой характер движения мезообъемов наиболее свойственен для нержавеющей стали, способной испытывать до разрушения высокие степени пластической деформации (рис. 6). Размер вихре-

вых образований определяется глубиной проникновения в поверхностный слой пластических деформаций при трении.

В образцах из закаленных сталей не было выявлено неоднородной вихревой пластической деформации, характерной для незакаленных пластичных материалов. Это объясняется существенным исчерпанием ресурса пластичности закаленных сталей. Для поверхностных слоев образцов из средне- и высокоуглеродистых закаленных сталей характерно трещинообразование и отделение частиц металла, причем трещины активно заполняются продуктами износа.

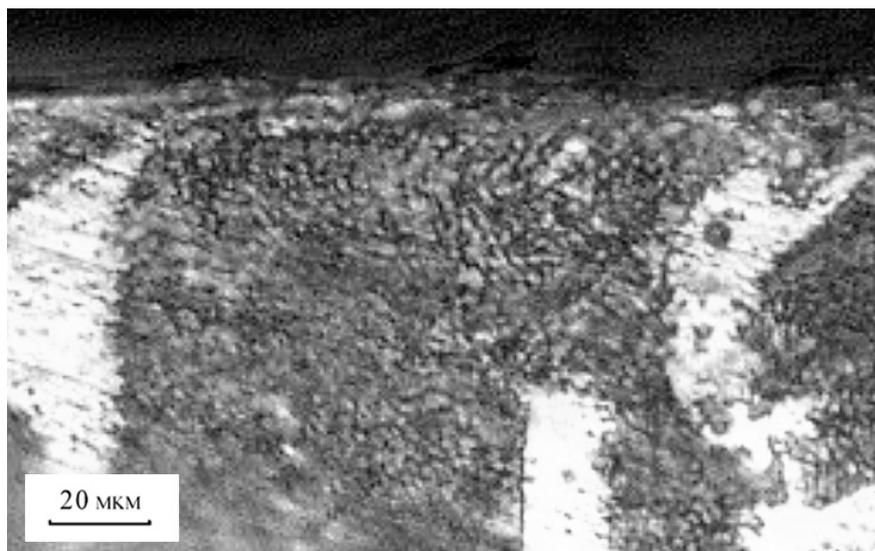


Рис. 5. Вихревой характер движения мезообъемов зерен перлита стали 45 (НВ 200...220) при трении

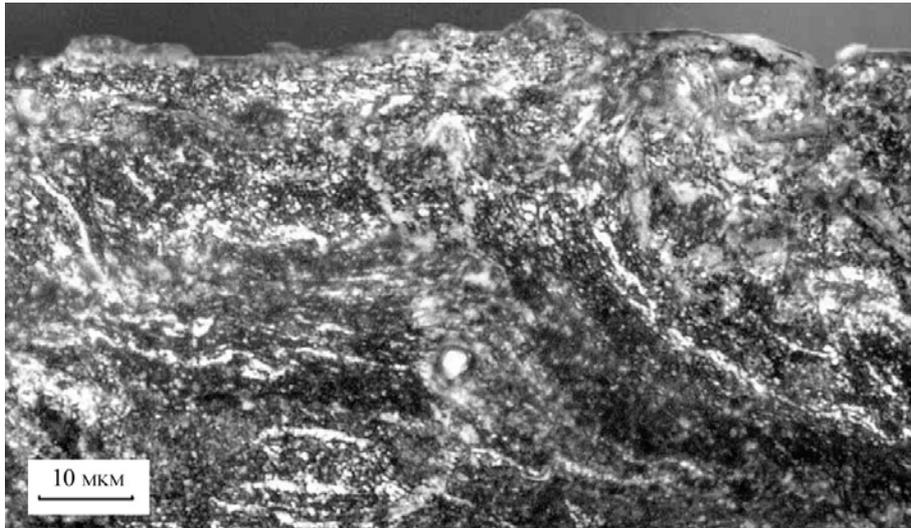


Рис. 6. Вихревой характер пластической деформации в приповерхностных слоях образца из стали 12X18H10T (HB 190...210)

Весьма часто при фрикционном разогреве поверхностных слоев среднеуглеродистых сталей образуются вторичные структуры, в том числе и оксидные. Наиболее активно такие структуры образовывались при испытании среднеуглеродистых незакаленных сталей. Поверхности трения образцов при этом приобретали ярко выраженный темный оттенок (рис. 7). В тех же условиях трения на образцах из не-

ржавеющих и закаленных сталей такого явления замечено не было.

Выявленные особенности структурообразования поверхностных слоев шлифованных деталей пар трения в процессе их эксплуатации способствуют развитию научных основ микро- и наноинженерии поверхностей трения деталей машин, подвергнутых финишной абразивной обработке.

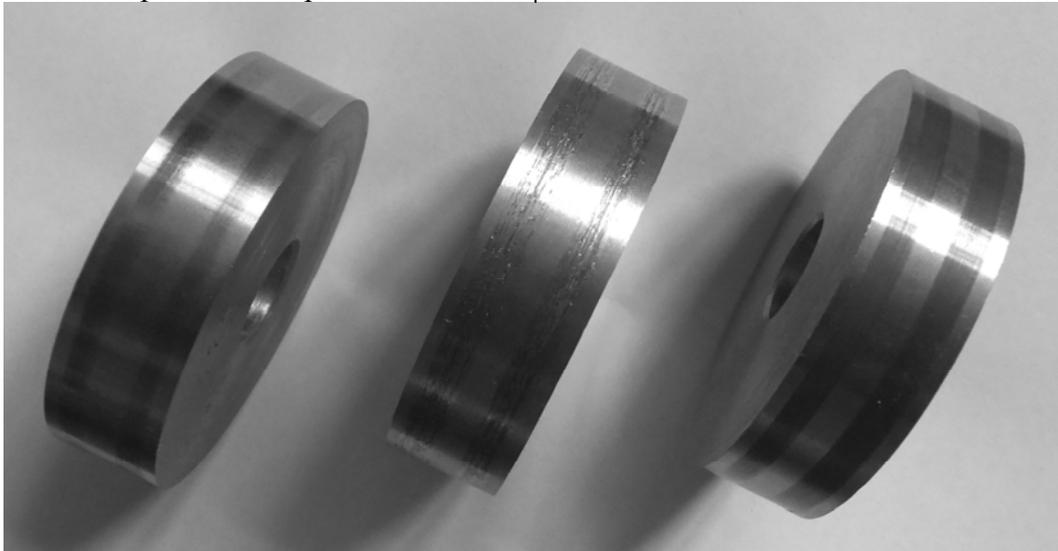


Рис. 7. Внешний вид стальных образцов после триботехнических испытаний: слева – образец из стали 35ХГСА (HRC 40...45), по центру – из стали 12X18H10T (HB 190...210), справа – из стали 45 (HB 200...220) с темными оксидными пленками на поверхностях трения

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Поверхностный слой после бесприжогового шлифования имеет толщину до 15...20 мкм и на глубине до 5...7 мкм

представляет собой мелкодисперсную структуру с хаотичной ориентацией зеренных блоков, которая существенно влияет на износостойкость деталей пар трения. Толщина поверхностного слоя и размеры зеренных блоков зависят от режимов обработки.

2. Интенсификация режимов абразивной обработки приводит к отслаиванию фрагментов материала образца с поверхности и более интенсивному отделению частиц износа при трении вследствие формирования при обработке поверхностных слоев с высокой степенью дефектности.

3. Проведенные экспериментальные исследования формирования микро- и наноструктур поверхностных слоев шлифованных деталей выявили различные механизмы их поведения при трении, существенно влияющие на износостойкость деталей пар трения.

4. На щадящих режимах обработки закаленных материалов (глубина резания до 8 мкм с последующим выхаживанием поверхности) в поверхностных слоях при трении наблюдается вихревая пласти-

ческая деформация материала (наиболее характерно для сталей аустенитного класса). При таком характере деформирования поверхностного слоя образцы обладают большей износостойкостью.

5. При трении незакаленных материалов поверхностные зерна дробятся и вытягиваются в направлении вектора скорости скольжения. У закаленных образцов существенной деформации поверхностных структур в указанном направлении не наблюдалось. Поверхностные слои образцов, подвергнутых обработке с глубиной резания более 16 мкм и без выхаживания, разрушались путем отслаивания фрагментов материала образца с поверхности, что приводило к более интенсивному изнашиванию.

Выявленные особенности структурообразования поверхностных слоев в процессе трения позволят управлять их повреждаемостью в результате усталостного изнашивания на стадии проектирования финишной абразивной обработки и эксплуатации деталей машин и механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин, В.Е. Физические принципы мезомеханики поверхностных слоев и внутренних границ раздела в деформируемом твердом теле/ В.Е. Панин, В.М. Фомин, В.М. Титов//Физическая мезомеханика. – 2003. – Т.6. – №2. – С.5-14.
2. Лотков, А.И. Наноинженерия поверхности. Формирование неравновесных состояний в поверхностных слоях материалов методами электронно-ионно-плазменных технологий/ А.И. Лотков [и др.]; отв. ред. Н.З. Ляхов, С.Г. Псахье. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 276с.
3. Бишутин, С.Г. Износостойкость деталей машин и механизмов/С.Г. Бишутин, А.О. Горленко, В.П. Матлахов; под ред. С.Г. Бишутина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 112 с.
4. Бишутин, С.Г. Износостойкость сформированных при шлифовании поверхностных слоев деталей машин/ С.Г. Бишутин, М.И. Прудников; под ред. С.Г. Бишутина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 100 с.
5. Бишутин, С.Г. Структурирование поверхностных слоев деталей при финишной абразивной обработке/ С.Г. Бишутин. – Брянск: БГТУ, 2009. – 100 с.
6. Бишутин, С.Г. Качество и износостойкость шлифованных поверхностей деталей автомобилей/ С.Г. Бишутин. – Брянск: Десяточка, 2011. – 100 с.
7. Когаев, В.П. Прочность и износостойкость деталей машин/В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. – М.:Высш. шк., 1991. – 319 с.
1. Panin, V.E. Physical principles of mesomechanics of surface layers and division inner boundaries in deformable solid/ V.E. Panin, V.M. Fomin, V.M. Titov//*Physical Mesomechanics*. – 2003. – Vol.6. – №2. – pp. 5-14.
2. Lotkov, A.V. *Surface Nano-engineering. Nonequilibrium State Formation in Surface Layers of Materials through Methods of Electronic-Ion-Plasma Technologies* / A.I. Lotkov [et al.]; Executive Editor N.Z. Lyakhov, S.G. Psakhie. – Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2008. – pp. 276.
3. Bishutin, S.G. *Wear Resistance of Machinery and Equipment*/S.G. Bishutin, A.O. Gorlenko, V.P. Matlakhov; under the editorship of S.G. Bishutin. – Bryansk: BSTU, 2010. – pp. 112.
4. Bishutin, S.G. *Durability of Machinery Surface Parts Formed at Grinding*/ S.G. Bishutin, M.I. Prudnikov; under the editorship of S.G. Bishutin. – Bryansk: BSTU, 2010. – pp. 100.

5. Bishutin, S.G. *Structuring of Machinery Surface Layers at Abrasive Finishing*/ S.G. Bishutin. – Bryansk: BSTU, 2009. – pp.100.
6. Bishutin, S.G. *Quality and Durability of Machinery Grinding Finish* / S.G. Bishutin. – Bryansk: Desyatochka, 2011. – pp. 100.
7. Kogayev, V.P. *Durability and Wear Resistance of Machinery*/V.P. Kogayev, Yu.N. Drozdov. – M.:Higher School,1991. – pp. 319.

Статья поступила в редколлегию 15.03.2016.

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Киричек А.В.*

Сведения об авторах:

Бишутин Сергей Геннадьевич, д. т. н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 51-19-97.

Суслов Анатолий Григорьевич, д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Сакало Владимир Иванович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Механика, динамика и прочность машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-86-37, e-mail: sakalo@tu-bryansk.ru.

Bishutin Sergey Gennadievich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Motor Transport”, Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 51-19-97.

Suslov Anatoly Grigorievich, D.Eng., Prof. Bauman State Technical University of Moscow.

Sakalo Vladimir Ivanovich, D.Eng., Prof., Head of the Dep. “Mechanics, Dynamics and Machinery Durability” Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-86-37, e-mail: sakalo@tu-bryansk.ru.