

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ЗА СЧЕТ УПРОЧНЕНИЯ ИХ ПОВЕРХНОСТИ

Виконано аналіз причин руйнування осей колісних пар при експлуатації. Встановлено зменшення глибини западин шорсткої поверхні у 3 рази при поєднанні чистового точіння та вібраційної обробки. Виявлено ефект зміцнення поверхневого шару на глибину 0,15 мм при дії вібрацій частотою 43 Гц та амплітудою $5 \cdot 10^{-3}$ м. Виявлено ефект зниження мікротвердості поверхневого зміцненого шару при збільшенні температури та тривалості дії вібрації.

Ключові слова: вісь колісної пари, аналіз причин руйнування, чистове точіння, вібраційна обробка, мікротвердість поверхневого зміцненого шару

Выполнен анализ причин разрушения осей колесных пар при эксплуатации. Установлено уменьшение глубины впадин шероховатой поверхности в 3 раза при сочетании чистового точения и вибрационной обработки. Выявлен эффект упрочнения поверхностного слоя на глубину 0,15 мм при воздействии вибраций частотой 43 Гц и амплитудой $5 \cdot 10^{-3}$ м. Обнаружен эффект снижения микротвердости поверхностного упрочненного слоя при увеличении температуры и продолжительности воздействия вибрации.

Ключевые слова: ось колесной пары, анализ причин разрушения, чистовое точение, вибрационная обработка, микротвердость поверхностного упрочненного слоя

The analysis of destruction causes of wheelset axles in service is performed. Reducing of depth of cavities of a rough surface is 3 times with a combination of the finish turning and vibration-formation processing. The effect of hardening the surface layer to a depth of 0.15 mm under the influence of vibration with frequency of 43 Hz and amplitude of $5 \cdot 10^{-3}$ m is exposed. The effect of reduction of microhardness of the hardened surface layer with increasing temperature and duration of exposure to vibration is detected.

Keywords: wheelset axle, analysis of destruction causes, finish turning, vibration-formation processing, microhardness of hardened surface layer

Введение

Наиболее важными задачами при создании скоростного транспорта, а также при ремонте эксплуатируемого подвижного состава является повышение технического уровня железнодорожного транспорта, его эксплуатационных характеристик, надежности и долговечности.

Оси колесных пар являются одним из ответственных элементов колесной пары, поэтому поверхностный слой стали осей должен иметь высокий уровень физико-механических свойств, который обеспечивал бы требуемые эксплуатационные свойства. Для повышения ресурса работы узлов и агрегатов необходимо глубокое изучение условий эксплуатации, причин и характера износа, а также процесса их разрушения.

Постановка проблемы в общем виде, ее связь с важными научными задачами

В процессе эксплуатации под действием повторно-переменных напряжений происходит процесс постепенного накопления поврежденных, как в области шейки, так и в подступичной части оси.

Под влиянием эксплуатационных факторов механические свойства постепенно изменяются и их значения отличаются от характеристик, имеющих в проектно-конструкторской документации на момент изготовления изделия. В работах отечественных и зарубежных исследователей отмечается, что причинами изменения механических свойств при эксплуатации могут быть следующие процессы: разупрочнение, упрочнение, деформационное старение. Однако, воздействие вибраций различного диапазона частот и амплитуд на выносливость и утомляемость углеродистых сталей изучено недостаточно.

Цель работы: повышение эксплуатационных свойств осей колесных пар из стали марки ОС за счет упрочнения их поверхности.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать процесс разрушения осей колесных пар в ходе их эксплуатации.
2. Рассмотреть методы поверхностного пластического деформирования, обеспечивающие повышение усталостной прочности.
3. Исследовать изменение микротвердости в поверхностном упрочненном слое в зависимо-

сти от вида обработки и режимов процесса вибрационной обработки образцов из стали ОС.

Анализ литературных источников

Усталостное разрушение проявляется в возникновении повреждений, которые нужно учитывать, особенно в сильно нагруженных узлах. Так, при эксплуатации оси колесных пар воспринимают постоянные нагрузки от веса вагона, что приводит к знакопеременному изгибу. Причиной разрушения оси в области шейки после 140 тыс. км пробега вагона по данным [1] стала неудовлетворительная работа конического подшипника кассетного типа, которая привела к его разрушению. Одной из причин поломки осей при эксплуатации является неверная регулировка подшипниковых узлов. Известно [2], что подшипники железнодорожного транспорта выбраковывают из эксплуатации из-за усталостного разрушения рабочих поверхностей колец и тел качения. По утверждению авторов работ [2, 3] от момента отказа буксового подшипника до его полного разрушения и излома шейки оси достаточно 7...30 км пробега в зависимости от веса груза.

Натурные испытания железнодорожных осей для определения границы прочности при утомлении авторы работы [4] проводили циклической нагрузкой на изгиб. Амплитуда напряжений составляла 195 Н/мм^2 . До излома ось выдержала $8 \cdot 10^6$ циклов нагрузки. Место разрушения – граница перехода от шейки к предматочной части оси.

Авторы работы [4] установили, что местами образования трещин являются запрессованные части, галтели, средняя часть оси, подступичная часть. Так в выполненном анализе [5] по безопасности движения на железнодорожном транспорте Украины установлено, что причиной аварии стал излом средней части оси колесной пары по старой трещине на расстоянии 152 мм от внутренней кромки ступицы левого колеса колесной пары. Известно, что возникновение трещин в средней части оси обусловлено наличием в верхнем слое металла неметаллических включений, плен, закатов, забоин. В [5] отмечено, что причиной разрушения оси в области шейки стала усталостная трещина в галтели шейки оси при второй обточке.

Причиной появления трещин в осях могут служить удары, которые испытывает колесная пара при неудовлетворительном качестве формирования колесной пары, при погрузке и выгрузке колесных пар.

Причиной образования трещин в подступичной части оси может стать обработка ступицы или подступичной части с большой конусностью или овальностью. При напрессовке колеса в подступичной части с большой конусностью, усилие, удерживающее колесо на оси будет неравномерно распространяться по подступичной части, при этом возникнут местные напряжения, которые и приведут к возникновению трещин.

На металл подступичной части оси действуют также сжимающие силы, вызванные напрессовкой зубчатого колеса.

Соединение «ось–колесо» в колесных парах локомотивов является ответственным соединением с натягом. Недостатком посадки с натягом является то, что в зоне напрессовки от контактных давлений и сил трения возникают значительные остаточные растягивающие напряжения. Поэтому для создания остаточных сжимающих напряжений, которые снижают величину растягивающих напряжений в локомотивных осях, используется накатывание роликами подступичных частей, посадочных мест под зубчатые колеса, шеек буксовых и моторно-осевых подшипников, а также прилегающих к ним участков галтелей.

В соединении «ось–колесо» остаточные напряжения сжатия от накатывания должны превосходить результирующие напряжения от посадки и рабочей нагрузки. При этом важна как величина сжимающих напряжений в слое, так и глубина, на которой напряжения действуют. Величина и характер напряжений, возникающих в поверхностном слое при накатывании роликами, зависит от усилий накатывания. Установлена неравномерность величины остаточных напряжений от максимальных до минимальных их значений вплоть до возникновения остаточных растягивающих напряжений в зависимости от усилий накатывания.

Следовательно, наибольшая вероятность образования усталостных трещин в осях в местах внешних шеек, прилегающих к галтелям, на подступичных частях, а также в средней части [1].

Повысить усталостную прочность можно за счет выбора оптимальной формы детали, улучшения шероховатости поверхности и применения различных методов упрочнения поверхности.

Известно, что предел выносливости зависит от состояния поверхности. Наибольшее значение предела выносливости имеет поверхность после операции полирования. На операциях

обточке, а так же при шлифовании на поверхности формируются риски, вызывающие объемное напряженное состояние, при котором затрудняется пластическая деформация, и создаются условия для разрушения.

В работе [4] отмечено, что на величину предела выносливости оказывает влияние величина среднего напряжения цикла, влияние которого может компенсировать величина остаточных напряжений после отделочно-упрочняющей обработки ударными рабочими телами. Поэтому замена термической обработки вибрационным поверхностным упрочнением, по мнению авторов работы [6], позволяет перераспределить напряжения в поверхностном слое. Автор работы [7] для обработки поверхностей сложной формы, в том числе и галтелей осей колесных пар, предлагает использование многоконтактного виброударного инструмента – шарико-стержневого упрочнителя. Технологической особенностью этого инструмента является способность осуществлять упрочняющую обработку локальных зон криволинейных поверхностей.

Автор работы [8] отмечает, что для прогноза повышения эксплуатационных свойств при изготовлении изделий, необходимо знать усталостные свойства данного материала, который может быть циклически упрочняющимся, циклически разупрочняющимся или быть циклически стабильным.

Ось колесной пары вращается, испытывая знакопеременные нагрузки, напряжения и деформации. Поэтому поломки осей имеют усталостный характер.

Анализ характера разрушения осей показал, что в большинстве случаев разрушение начинается в поверхностном слое. Следовательно, сопротивление разрушению зависит от качества поверхностного слоя, которое можно целенаправленно изменять в зависимости от способа обработки поверхности. Важными характеристиками поверхностного слоя, влияющими как на усталость материала, так и на сопротивление износу, является наклеп и остаточные напряжения, которые зависят от технологии обработки поверхности. Как правило, наклеп и остаточные напряжения сжатия при испытаниях в условиях комнатных температур повышают предел выносливости. Однако, однозначного ответа на вопрос сохраняется ли сопротивление усталости при повышенных температурах материалов, упрочненных методами поверхностной пластической деформации нет.

Эффективными технологическими методами повышения качества поверхностного слоя являются методы поверхностного пластического деформирования, к которым относятся дробеструйная, пневмодинамическая и вибрационная ударная обработка. Обработка изделий при использовании этих методов осуществляется на станках без жесткой кинематической связи инструмента и обрабатываемого материала, в ходе которой осуществляется динамическое воздействие инструмента или элементов рабочей среды на обрабатываемую поверхность.

Учитывая тот факт, что дробеструйная и вибрационная обработка свободными ударными телами относятся к одной группе методов поверхностного пластического деформирования (ППД), то исследования закономерностей формирования упрочненного слоя можно осуществлять на образцах-свидетелях с использованием вибрационных останков с их максимальной нагрузкой.

Особенностью процесса виброударного упрочнения является способность стальных шариков под действием интенсивных колебаний динамически сопрягаться со сложной поверхностью детали и образовывать на ней множество локальных пластических отпечатков, которые образуют сплошную вновь обработанную поверхность.

Эффективным технологическим методом повышения качества поверхностного слоя деталей является вибрационная обработка, обеспечивающая поверхностное пластическое деформирование, приводящее к изменению параметров качества поверхностного слоя: уменьшению шероховатости, изменению микроструктуры, повышению микротвердости, созданию оптимальных остаточных напряжений.

Материалы и образцы

Образцы из стали марки ОС после различных операций обработки поверхности.

Методы исследования

Для определения глубины и степени наклепа поверхностного слоя использовался метод измерения микротвердости. Микротвердость поверхностного слоя измерялась на изготовленных образцах микрошлифов на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 0,490 Н в соответствии с методикой [9].

Для крупногабаритных деталей сложной формы (к которым относится ось колесной пары) необходима разработка специального обо-

рудования. Поэтому для исследования закономерностей формирования упрочненного поверхностного слоя на стали марки ОС использовался метод аналогов.

Для лабораторных испытаний по формированию упрочненного поверхностного слоя на образцах-свидетелях использовалось оборудование лаборатории ОНИЛОСА Восточноукраинского национального университета имени В. И. Даля.

Виброударное упрочнение осуществлялось на вибрационных станках с максимальной амплитудой колебаний контейнера $5 \cdot 10^{-3}$ м и частотой колебаний 43 Гц.

Степень наклепа рассчитывалась по формуле:

$$N = \frac{H'_\mu - H_\mu}{H_\mu} \cdot 100 \%,$$

где H'_μ – микротвердость обработанной поверхности; H_μ – микротвердость исходного материала. Испытания образцов на изгибную усталость проводилось по методике [10].

Результаты исследований

В работе установлены оптимальные режимы вибрационной обработки образцов из стали марки ОС. Известно, что наиболее стойкими к знакопеременным нагрузкам становятся детали, подвергшиеся поверхностному пластическому деформированию.

Результаты испытаний образцов на усталость при растяжении приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследований

Значение пределов ограниченной усталости при растяжении, МПа		Количество циклов при пределах ограниченной усталости	
При шлифовании образцов	При вибрационной обработке	При шлифовании образцов	При вибрационной обработке
648	720	$9 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$
580	650	$1,7 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^5$
567	630	$2,5 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^5$

Анализ результатов испытаний на усталость образцов показал, что значения пределов ограниченной усталости при растяжении образцов, подвергнутых вибрационной обработке на 10 %

выше, чем у образцов, обработанных по серийной технологии. Для установления влияния различных режимов деформационного упрочнения на сопротивление износу поверхностного слоя стали марки ОС были проведены исследования по определению таких характеристик как степень наклепа и распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя.

Результаты испытаний образцов показали, что при вибрационной обработке усталостная прочность стали увеличивается на 10...12 %. Увеличение усталостной прочности можно объяснить улучшением качества поверхности за счет уменьшения шероховатости поверхности и удаления рисок – концентраторов напряжений.

На рис. 1 представлена поверхность образцов из стали марки ОС после различных видов обработки.

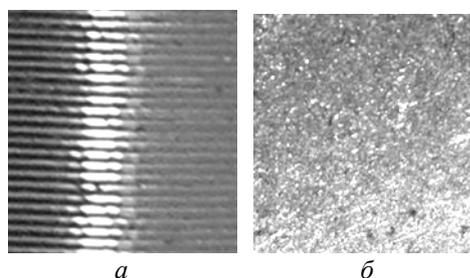


Рис. 1. Поверхность стальных образцов стали марки ОС:

а) после операции точения до вибрационной обработки с $R_a = 3,42$ мкм; б) после вибрационной обработки $R_a = 1,75$ мкм

На рис. 2, 3 и 4 представлены профилограммы после операции точения, чистовой обработки, а также при сочетании чистового точения и вибрационной обработки в течение 60 мин.

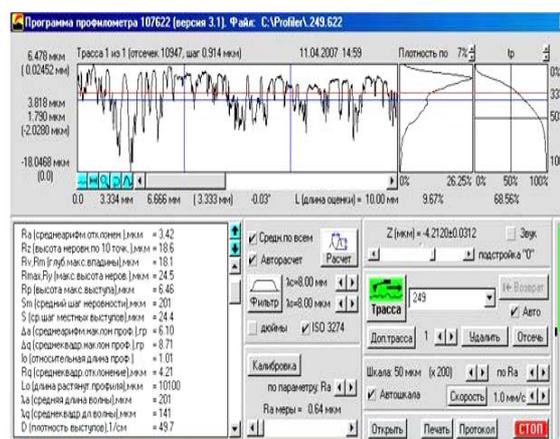


Рис. 2. Профилограмма поверхности образца из стали марки ОС после операции точения

Анализ профилограмм показал, что сочетание операций чистового точения и вибрационной обработки позволяет в ~ 3 раза уменьшить глубину максимальных впадин.

Как известно, физико-механические свойства поверхностного слоя является одной из наиболее важных характеристик качества поверхности, которые определяют эксплуатационные свойства деталей машин. Эти свойства характеризуются глубиной и степенью наклепа поверхностного слоя. Наклеп можно охарактеризовать величиной микротвердости. На рис. 5 приведены результаты измерений микротвердости стали марки ОС после различных режимов обработки.

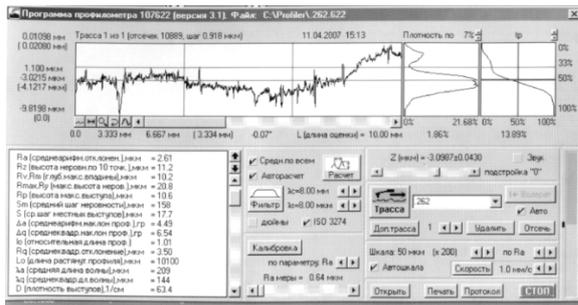


Рис. 3. Профилограмма поверхности образца из стали марки ОС после чистовой обработки

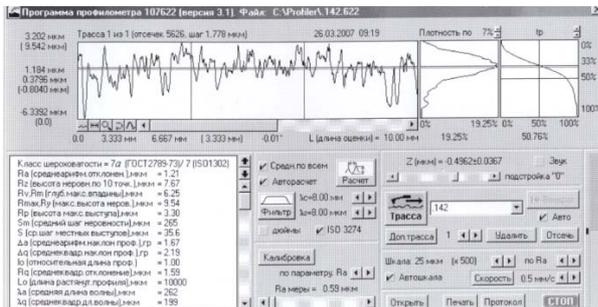


Рис. 4. Профилограмма поверхности образца из стали марки ОС после чистового точения и вибрационной обработки

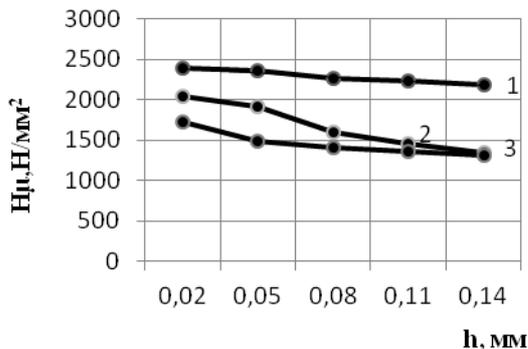


Рис. 5. Изменение микротвердости упрочненного слоя стали марки ОС после точения:
1 – без нагревания; 2 – при нагревании до 300 °C;
3 – при нагревании до 400 °C

Микротвердость упрочненного слоя при точении без нагревания достигает значения 2190 Н/мм², глубина упрочненного слоя составляет не больше 0,15 мм. Микротвердость упрочненного слоя при точении с нагреванием значительно меньше и принимает значения от 1460 до 2040 Н/мм², глубина упрочненного слоя не превышает значения 0,11 мм. При этом величина микротвердости и глубина упрочненного слоя уменьшается при увеличении температуры нагрева. На рис. 6 приведены результаты изменения микротвердости при вибрационной обработке стальными шариками в течение 120 мин

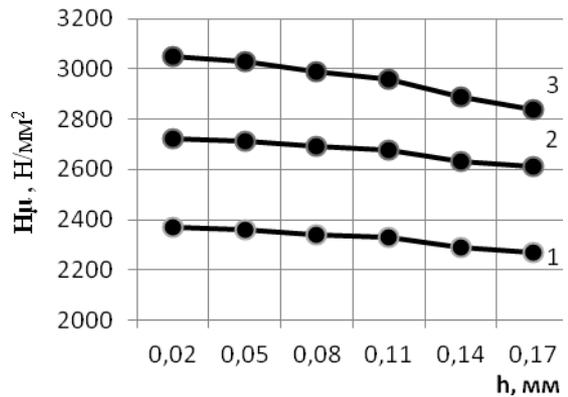


Рис. 6. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя углеродистой стали марки ОС при вибрационной обработке на частоте 43 Гц:
1 – микротвердость после точения; 2 – обработка стальными шариками диаметром $3...5 \cdot 10^{-3}$ м в течение 120 мин при амплитуде колебаний $5 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – обработка твердосплавными шарами диаметром $3...5 \cdot 10^{-3}$ м в течение 120 мин при амплитуде колебаний $5 \cdot 10^{-3}$ м

Результаты измерений микротвердости в поверхностном слое стали марки ОС позволили выявить эффект упрочнения. Глубина упрочненного поверхностного слоя зависит как от температуры, так и от продолжительности воздействия вибраций.

Анализ причин выхода из строя деталей машин показывает, что разрушение деталей, в большинстве случаев, начинается с поверхностного слоя, так как поверхностные слои испытывают максимальное напряжение от внешних нагрузок. Сопротивление разрушению зависит от качества поверхности, которое определяется совокупностью таких характеристик как шероховатость, физико-механическое состояние и микроструктура поверхностного слоя металла. Качество поверхности оказывает решающее влияние на развитие усталостных явлений, коррозии и других процессов, возникающих при эксплуатации узлов.

Выводы

1. Исследован процесс разрушения осей колесных пар в ходе их эксплуатации. Установлено, что разрушение осей колесных пар как правило, происходит в поверхностном слое.

2. Рассмотрены методы поверхностного пластического деформирования поверхностного слоя, обеспечивающие повышение усталостной прочности. Анализ результатов испытаний на усталость образцов показал, что значения пределов ограниченной усталости при растяжении образцов, подвергнутых вибрационной обработке на 10 % выше, чем у образцов, обработанных по серийной технологии.

3. Исследовано изменение микротвердости в поверхностном упрочненном слое в зависимости от вида обработки образцов из стали марки ОС. Установлено, что при точении поверхности без воздействия температуры формируется упрочненный поверхностный слой глубиной до 0,15 мм, значение микротвердости в котором составляет 2190 Н/мм². Выявлено, что при точении и воздействии температуры 300 °С микротвердость принимает значения от 1460 до 2040 Н/мм², глубина упрочненного слоя не превышает значения 0,11 мм. При увеличении температуры до 400 °С глубина поверхностного упрочненного слоя уменьшается до 0,08 мм, а микротвердость достигает значения 1400 Н/мм².

4. Выявлен эффект упрочнения поверхностного слоя при воздействии вибрации частотой 43 Гц и амплитудой колебаний $5 \cdot 10^{-3}$ м. Установлено снижение микротвердости с 2970 до 2800 Н/мм² поверхностного слоя глубиной до 0,15 мм стали марки ОС при вибрационной обработке стальными шарами на частоте 43 Гц и при амплитуде $5 \cdot 10^{-3}$ м колебаний вибрационного резервуара в течении 2 часов.

5. Для крупногабаритного изделия, которым является ось колесной пары, рекомендуется использование оборудования для дробеструйной обработки, что обеспечит равномерное распределение величины остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левыкин, Ф. В. Дефектоскопия деталей локомотивов и вагонов [Текст] / Ф. В. Левыкин. – М.: Транспорт, 1974. – 240 с.
2. Тимофеев, В. А. Проблемы неразрушающего контроля буксового узла колесной пары и их влияние на безопасность движения [Текст] / В. А. Тимофеев // Заліз. трансп. України. – 2008. – № 6. – С. 42-46.
3. Кривобок, В. И. Передовой опыт ремонта колес и буксовых узлов на вагоноремонтных предприятиях Юго-Западной железной дороги [Текст] / В. И. Кривобок // Заліз. трансп. України. – 2008. – № 4. – С. 19-22.
4. Розвиток процесів руйнування осі колісної пари при циклічному навантаженні [Текст] / І. О. Вакуленко [та ін.] // Заліз. трансп. України. – 2008. – № 3. – С. 47-48.
5. Гаврилюк, А. Ф. Состояние и анализ безопасности на железных дорогах Украины [Электрон. ресурс] / А. Ф. Гаврилюк, Т. А. Рябец. – Режим доступа: //Ndt.com.ua/tools.htm
6. Лубенская, Л. М. Перераспределение напряжений в закаленном слое ведущих зубчатых колес тепловозов 2ТЭ10Л при воздействии низкочастотных колебаний [Текст] / Л. М. Лубенская, П. В. Колодяжный // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2010. – Ч. 1. – № 5. – С. 81-86.
7. А.с. №1539051. Устройство для поверхностной отделочно-упрочняющей обработки деталей [Текст] / И. А. Бабичев [и др.]. – Оpubл. в Б. И. 34, 1990. – С. 37.
8. Тамаркин, М. А. Моделирование технологических процессов обработки в гранулированных рабочих средах [Текст] / М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко // Вопросы вибрационной технологии: Межвуз. сб. науч. статей. – Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2010. – 230 с.
9. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников [Текст]. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1977. – 41 с.
10. ГОСТ 2860-65. Металлы, методы испытания на усталость [Текст]. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1978. – 42 с.

Поступила в редколлегию 30.11.2010.

Принята к печати 06.12.2010.