

УДК 621.751.47

А.В. ЛОСЕВ¹, В.А. ФАДЕЕВ²

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

²ГП «Харьковский машиностроительный завод ФЭД», Украина

ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И В МАШИНОСТРОЕНИИ

В статье рассматривается влияние технологических загрязнений поверхностей деталей на ресурс и надежность изделий машиностроения.

ликвиды, частицы, промышленная чистота, микрорельеф, надежность, ресурс

Об интенсивном развитии зачистных и отделочных технологий в высокоразвитых в промышленном отношении странах можно судить по нарастающему объему информации в последние пятнадцать лет. Только в США за эти годы число фирм, работающих в данной области техники, увеличилось в несколько раз. За этот период количество отделочно-очистных методов выросло до 110 и на порядок больше моделей оборудования для их реализации. В Японии, Китае, Южной Корее и др. странах организованы специализированные научно-исследовательские центры по развитию отделочно-зачистных технологий [1, 2].

В чем причина столь пристального внимания ведущих машиностроительных фирм мира к исследованиям и разработкам в этой области техники, а отечественное машиностроение, за исключением аэрокосмической отрасли, практически не использует эту группу технологий? Попробуем проанализировать отечественные и зарубежные работы в данной области техники.

Многие исследователи объясняют необходимость удаления ликвидов по следующим причинам: функциональным, эргономическим и эстетическим.

1. Эстетические – ухудшение товарного вида изделий, ухудшают сцепление с лакокрасочными и другими покрытиями.

2. Эргономические – опасность травмирования в

процессе работы и способствуют повреждению поверхностей при транспортировке.

3. Функциональные – это предотвращение отказов гидравлических систем, связанные с заклиниванием распределительных и регулирующих устройств, а также повышенного износа ответственных деталей, происходящего при попадании в зазоры трущихся пар твердых металлических частиц [3 – 5] затруднение при сборке и позиционировании, снижение усталостной прочности и т.п. Частицы заусенцев или материала инструментов, попадая в гидравлическую либо пневматическую систему, переносятся рабочей средой по всей системе, повреждают или нарушают работу наиболее чувствительных элементов: манжетных уплотнений, золотниковых, плунжерных пар, подшипников, зубчатых передач, деталей замков, клапанов и др. Заусенцы вызывают завихрения в потоке газа или жидкости, нарушая равномерность потока. Удаление ликвидов это неотъемлемая часть мероприятий по обеспечению промышленной чистоты в производстве изделий машиностроения.

По литературным данным отделочно-зачистные технологии в Японии, США, Германии, Южной Корее и др. странах являются обязательной частью целостных технологических систем, обеспечивающих функционально необходимую надежность и ресурс машин. Интенсивный износ трущихся пар и

выход их из строя отмечен при наличии в рабочих жидкостях металлических и др. загрязняющих частиц [3, 5]. Повышение тонкости очистки в гидравлических системах с 25 до 5 мкм позволяет увеличить срок службы: насосов в 10 раз; гидроаппаратуры в 5...7 раз. Очистка гидросистем с 25 до 3 мкм обеспечивает увеличение ресурса прецизионных элементов оборудования в 6...8 раз [3, 4].

Гранулометрический анализ твердых частиц, обнаруженных в полостях и на поверхностях деталей агрегатов летательных аппаратов, позволил выявить, что доминирующими являются металлические. Разброс размеров металлических частиц от сотых долей до 200 мкм. Наиболее массовые частицы (более 95%) имеют величину менее 10 мкм, из них более 98% частиц имеют размеры менее 5 мкм [6]. Причем их количество с уменьшением размеров увеличивается по гиперболической зависимости.

При изучении технологических загрязнений на поверхностях деталей было выявлено, что все виды механической обработки, при которых используется режущий инструмент, образуют на поверхностях и кромках помимо заусенцев (200...50 мкм) еще микрочастицы и микрозаусенцы (50 мкм и менее), обладающие большой проникающей способностью из-за своих размеров.

В отечественном машиностроении до сих пор имеют место упрощенные взгляды на очистку деталей и полостей агрегатов от твердых микро- и макро- частиц. Достаточно большое количество работ приводят противоречивые сведения о связи размера частиц с величиной зазора и износом трущихся пар. В одних литературных источниках указывают: если частицы свободно проходят через зазор, то они не вызывают повреждений и износа; в других утверждается о безвредности твердых частиц менее 1,0 мкм; некоторые исследователи считают, что даже частицы в доли микрона вызывают износ и способны при вести к выходу из строя изделий при возникновении неблагоприятных условий работы

(экстремальных нагрузок, температур, скоростей и т.п.). В то же время практически все авторы отмечают влияние на интенсивный износ трущихся пар продуктов процесса приработки. Следует отметить, что размеры твердых частиц образующихся в процессе приработки измеряются сотыми долями микрометра. Противоречивые сведения свидетельствуют об отсутствии достоверной информации по данной теме.

Обследование предприятий различных отраслей позволило определить удельный вес отделочно-зачистных операций в общей трудоемкости изготовления изделий: в производстве боеприпасов – до 70%, в авиадвигателестроении – до 46%, в приборостроении – до 38%, в ракетостроении – до 40%, в судостроении (арматурное производство) – 10...22%, в электротехнической промышленности – до 16%, в станкостроении – 8...15%, в автомобилестроении – 4...10%, в тракторостроении – 2...8% [7]. Трудоемкость отделочно-зачистных операций косвенно отражает качество выпускаемой продукции. Установлено, что кроме производства боеприпасов и аэрокосмической промышленности, машиностроители СНГ не связывают качество выпускаемых машин с технологиями по обеспечению промышленной чистоты.

Рассмотрим на примере производства и эксплуатации агрегатов аэрокосмической техники влияния технологических загрязнений на эксплуатационные показатели. Для агрегатного производства характерны: высокая точность изготовления деталей; многономенклатурность деталей и материалов; высокие требования к надежности изделий, которую обеспечивают качество очистки; микронные зазоры в подвижных золотниковых и плунжерных парах; ограниченное применение абразивной обработки из-за шаржирования обрабатываемых поверхностей; постоянное обновление выпускаемых изделий; мелкосерийность производства. Для деталей агрегатов характерны: сложная конфигурация внутренних и

внешних поверхностей деталей; малая жесткость; глубокие отверстия малых диаметров (0,8...1,5 мм); пересекающиеся каналы с расточками и карманами; наличие тонкостенных элементов, мелких резьб, глухих отверстий и каналов длиной более десяти диаметров и т.п.; допуски на взаимное расположение осей отверстий в пределах $\pm 0,01...0,1$ мм; биение резьбы относительно отверстий не более 0,05 мм; поля допусков на размеры охватываемых поверхностей – по 6-11-му квалитетам; поля допусков на размеры охватываемых поверхностей – по 5 – 7-му квалитетам; отклонение от геометрической формы прецизионных пар – 1...3 мкм; допуск на зазор в пределах 2...4 мкм; допуск на расстояние между отсечными кромками – 5...15 мкм; шероховатость от 3,2...0,8 мкм соединительных каналов до 0,04 мкм плунжерных и золотниковых пар и т.п.; использование высоколегированных сплавов и сталей – ЭИ347-Ш, ЭП176, ЭИ415, 38Х2МЮА, 9Х1 и др., алюминиевых сплавов – Ал9, АК4 и др., имеющих различную твердость.

Твердые частицы являются абразивом по отношению к более мягким материалам деталей агрегатов. В работах [6, 8] приведены данные о зависимости съема материала от размера твердых частиц. Обеспечение промышленной чистоты авиационных агрегатов в производстве и эксплуатации в значительной степени зависит от определения источников загрязнения. Поэтому нами были исследованы все виды механической обработки, в основу которых положены процессы резания, и установлено, что они сопровождаются образованием заусенцев на кромках, а также микрозаусенцев и микрочастиц на поверхностях деталей [6, 7, 9]. Известно, что подавляющее количество загрязняющих частиц, образующихся в процессе производства, имеют размеры менее 5 мкм [10]. В то же время установлен факт постепенного увеличения концентрации частиц малой величины в рабочих жидкостях в процессе эксплуатации, не удерживаемых бортовыми фильтра-

ми, на порядок и более. При этом статистика отказов показывает, что основная доля приходится на превышение норм по массовой концентрации. Пример зависимости наработки на отказ золотниковых агрегатов ГА-142, ГА-163, ГА-213 и гидронасосов НП-43М, НП-9 от класса чистоты рабочих жидкостей с учетом превышения норм по массовой концентрации < 5 мкм показана в публикации [11]. Увеличение количества частиц в два раза уменьшает ресурс в четыре раза. Очевидность влияния микрочастиц на ресурс агрегатов не вызывает сомнения. Поэтому одним из наиболее важных мероприятий по обеспечению безотказности и увеличению ресурса гидротопливных агрегатов машин является очистка поверхностей и кромок деталей от технологических загрязнений в виде частиц металла. Топливные и гидравлические агрегаты летательных аппаратов имеют большое количество различных по конструкции и назначению золотниковых и плунжерных пар. По существу надежность агрегатов определяют наиболее точные элементы конструкции – золотниковые и плунжерные пары. Необходимым условием безотказной работы является высокая стабильность сил трения в данных парах [3, 6, 9]. Попадая в зазоры между рабочими поверхностями прецизионных пар, твердые частицы могут вызвать увеличение сил трения, задиры и заклинивание трущихся пар. Вероятность повреждения механизмов зависит от концентрации загрязняющих частиц. Причем чем точнее механизм, тем ощутимее влияние частиц. На рис. 1 приведены статистические данные причин съемов авиационных двигателей с испытаний в процессе производства [12]. Подавляющее большинство съемов двигателей связано с технологическими загрязнениями.

В отечественном машиностроении существует понятие “установившейся“ или “равновесной“ шероховатости, которая образуется в начальный период эксплуатации машин в процессе износа пар трения и не соответствует шероховатости заданной в

чертежах. Это обстоятельство ставит под сомнение эффективное влияние заданной шероховатости поверхностей деталей на эксплуатационные характеристики машин [11]. Отметим, что процесс приработки сопровождается интенсивным износом трущихся пар, который может достигать 50% допустимого износа. Ликвидация или уменьшение износа на стадии приработки обеспечит значительный рост ресурса изделий. Устранение не контролируемого изменения микрорельефа поверхностей трущихся пар позволяет в конечном итоге прогнозировать ресурс и надежность изделий машиностроения. Работы по созданию износостойкого микрорельефа ведут во многих развитых в промышленном отношении странах [13]. Например, в соответствии со стандартом DIN 4776, действующим в западноевропейских странах, контролируют кроме параметров микрогеометрии поверхности форму профиля.

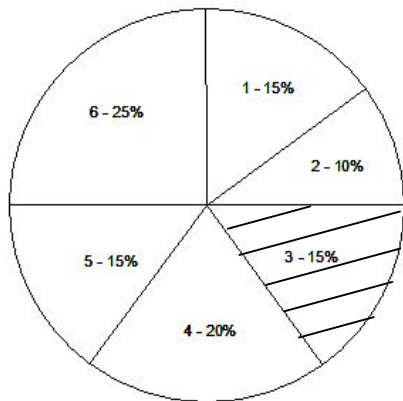


Рис. 1. Статистические данные отказов авиадвигателей на стендовых испытаниях:
 1 – несоблюдение требований по чистоте при технологических процессах сборки;
 2 – загрязненность продуктами приработки при испытаниях;
 3 – нетехнологичность конструкций двигателей и их узлов;
 4 – некачественная очистка рабочих жидкостей;
 5 – недостаточная объективность контроля качества очистки от загрязнений;
 6 – несовершенство методов промывки деталей, узлов и собранных деталей

Используя кривую Аббота-Файерстоуна, можно выделить следующие элементы профиля шероховатости (рис. 2): усредненную высоту выступов; быстро изнашивающуюся в начальный период эксплуа-

тации (R_{pk}); глубину неровностей профиля поверхности, являющуюся основой профиля поверхности, длительное время находящуюся в работе, и оказывающую основное влияние на срок службы изделия (R_k); усредненную глубину впадин, определяющих смазывающую способность поверхности (R_{vk}).

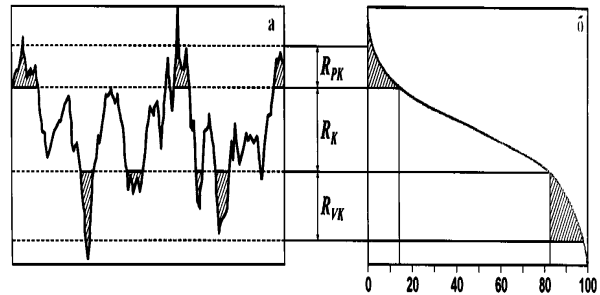


Рис. 2. Профилограмма(а) и кривая Аббота-Файерстоуна (б): R_{pk} – быстро-изнашивающаяся часть профиля; R_k – часть профиля при длительной эксплуатации; R_{vk} – усредненная глубина впадин профиля, удерживающих смазку

Математически кривая Аббота-Файерстоуна представляет собой кривую суммарной частоты ординат профиля [14]. Определение характеристик профиля шероховатости позволяет на стадии изготовления сформировать функционально необходимый микрорельеф поверхностей (получить износостойчивый профиль) и избежать интенсивного износа в эксплуатации, а значит, и загрязнения гидравлических систем. Результаты контроля параметров микрогеометрии поверхностей косвенно объясняют изменение шероховатости после приработки трущихся пар. Зависимость величины съема материала от величины твердых частиц выглядит так: для мягких материалов (алюминиевых сплавов, меди) толщина стружки составляет 25...15% от размера абразивной частицы, для сталей – 12...7%, материалов с твердостью закаленных сталей – около 4...5%. Размеры металлических частиц и микрозаусенцев на поверхностях соизмеримы с величиной их шероховатости. Наиболее чувствительны к микронным технологическим загрязнениям пары трения работающие при больших нагрузках, высоких скоростях, например, подшипники турбокомпрессоров,

турбореактивных двигателей, гироскопов, шпинделей станков и др.

Существуют различные пути обеспечения необходимой чистоты деталей машин или снижения негативных влияний от технологических загрязнений. Используются виды обработки, позволяющие получить более малую величину микро неровностей (на два, три порядка меньше зазора в сопряжении) и, следовательно, меньшие по размерам ликвиды. Т.е. имеет место завышение класса шероховатости, что приводит к гиперболическому увеличению стоимости механической обработки при ухудшении условий смазки со всеми вытекающими отсюда последствиями. Прогрессивное направление решения проблемы – создание отделочно-зачистных технологий, позволяющих формировать функционально необходимый микро рельеф поверхностей деталей.

Только в США более 2000 тысяч фирм работают в данной области. За последние 10 лет количество отделочно-очистных методов увеличилось с 80 до 110 [1, 7] и на порядок больше моделей оборудования для их реализации. Однако накопленный опыт стран Западной Европы, США, Японии и др., где преобладают мелкие, специализированные фирмы, требует всестороннего изучения и адаптации к условиям отечественной промышленности. Разумеется, что решение проблемы повышения ресурса и надежности машин и механизмов носит комплексный характер и закладывается в процессе обоснования схемных, конструктивных и технологических решений, обеспечивается в производстве целостными технологическими системами при обработке, сборке, техническом контроле и испытаниях, реализуется и поддерживается в эксплуатации. Но несомненно группа отделочно-зачистных технологий должна рассматриваться как неотделимая часть целостных технологических систем и на одном уровне с токарной, фрезерной и другими механическими видами обработки и дополнять их.

Особенностью отделочно-зачистных технологий

является то, что их эффективность проявляется лишь при условии обработки 100% деталей, входящих в автономную гидросистему, агрегат и др. В условиях наших многономенклатурных производств обеспечить увеличение надежности и ресурса машин возможно при использовании 10...20 методов и на порядок больше соответствующего оборудования.

В 90, 91-х годах по инициативе министерства станкостроения СССР была предпринята попытка организовать Всесоюзный научный центр отделочно-зачистной обработки и разработать “Общесоюзную программу работ по снижению трудоёмкости ОЗО и ликвидации ручного труда на операциях ОЗО в машиностроении“. Эта программа предусматривала комплексное развитие нового направления техники и технологий, включала организационные мероприятия по производству оборудования, систематизацию существующих разработок, создание справочных материалов, организацию подготовки кадров в высшей школе и др. Системная работа по развитию данного направления техники не состоялась из-за распада СССР. Усилиями Национального аэрокосмического университета (ХАИ) и ряда заинтересованных предприятий авиационной промышленности были продолжены и ведутся исследования по термоимпульсной очистке поверхностей и кромок сложнопрофильных деталей от макро- и микрозаусенцев, частиц, а также по отделке поверхностей (снижению величины шероховатости). Наличие макро- и микрозаусенцев и частиц на поверхностях и кромках деталей после некоторых видов механической обработки, включая суперфинишные приведены на рис. 3 – 5. Здесь показаны типовые ликвиды после токарной обработки, шлифования и обработки чугуном притиром. Микроструктура частиц свидетельствует о большей твердости, чем материал деталей. На рис. 6 показан исходный и износостойкий микро рельеф поверхности образца детали после шлифования и термоимпульсной отделки.



Рис. 3. Заусенец на поверхности детали после токарной обработки ($\times 240$)

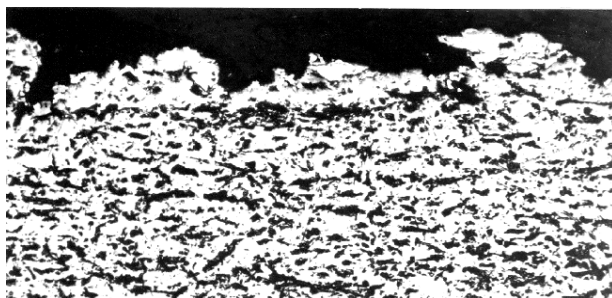


Рис. 4. Микрочастицы на поверхности детали после шлифования стальных деталей ($\times 240$)

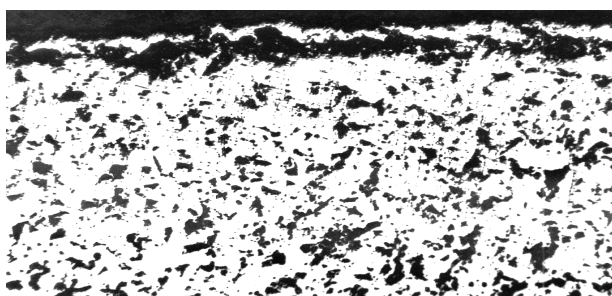


Рис. 5. Ликвиды после доводочной операции, притирки ($\times 350$)

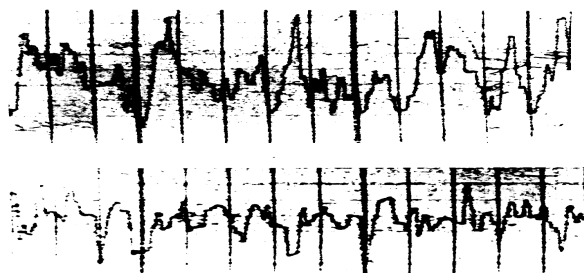


Рис. 6. Исходный ($R_a - 1,86 \dots 1,94$) и износостойкий ($R_a - 1,21 \dots 1,07$) микрорельеф поверхности

На рис. 7 представлены фрагменты поверхностей шестерен до и после термоимпульсной обработки.

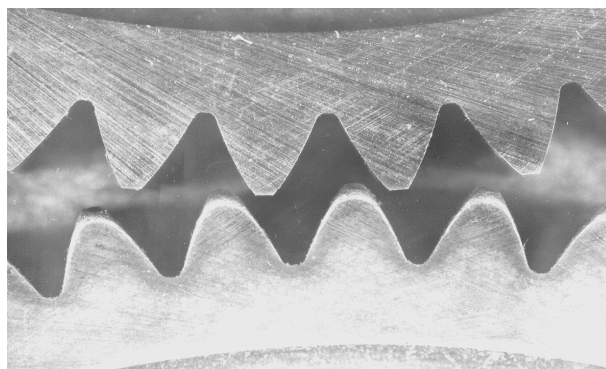


Рис. 7. Фрагменты шестерен до и после термоимпульсной обработки

Помимо скругления кромок зубьев наблюдается снижение высоты микронеровностей с $R_a - 2,6 \dots 3,4$ до $R_a - 1,4 \dots 1,7$.

Заключение

В отраслях по производству аэрокосмической техники Украины, а также в машиностроении высокоразвитых в промышленном отношении стран отделочно-зачистные операции рассматривают как необходимое средство обеспечения надежности, гарантированного ресурса и в конечном итоге высокого качества выпускаемых изделий. Поскольку производство летательных аппаратов является многономенклатурным, единичным или мелкосерийным, то выполнение всего комплекса работ (от исследований до серийного производства) по обеспечению отрасли отделочно-очистными технологиями и техникой весьма проблематично.

Невосприимчивость машиностроения Украины к массовым производствам и стран СНГ к отделочно-очистным технологиям стала сдерживающим фактором в развитии этого направления техники, что негативно сказывается на качестве выпускаемой продукции, включая летательные аппараты.

Очистка поверхностей и кромок деталей от микро- и макроликвидов после формообразования, включая быстро изнашивающуюся часть профиля микронеровностей, должна выполняться комплексно, с учетом особенностей работы автономных агрегатов или гидравлических и пневматических систем.

Ликвиды при массовом загрязнении рабочих жидкостей вызывают интенсивный износ трущихся пар, снижают такие эксплуатационные характеристики машин и механизмов как ресурс и надежность

Игнорирование отделочно-зачистного класса технологий не позволит отечественным машиностроителям производить конкурентоспособную продукцию.

Для обеспечения отечественной промышленности отделочно-зачистными технологиями и оборудованием необходима координация работ на государственном уровне, кооперация заинтересованных предприятий и исследовательских подразделений, подготовка кадров в высшей школе.

Литература

1. Gillespie La Roux K. Worldwide Trends of Burr Technology & Present Status in the U.S.A // 6th International Conference "Precision Surface Finishing and Deburring Technology-2000". – P. 6-57.
2. Лосев А.В., Жданов А.А., Сломинская Е.Н. Сравнительный анализ существующих методов и выбор очистки поверхностей деталей авиационных агрегатов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2003. – № 1. – С. 108-116.
3. Белянин П. Н., Данилов В.М. Промышленная чистота машин. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
4. Никитин Г.А., Чирков С.В. Влияние загрязненности жидкости на надежность работы гидросистем летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1969. – 183 с.
5. Такая К. Проблемы и необходимость технологии удаления заусенцев // *Ое кикай котаку*. – 1977. – Т. 18, № 5. – С. 40-45.
6. Жданов А.А. Обеспечение качества гидротопливных агрегатов летательных аппаратов за счет новых технологий. // *Технологические системы*. – 2002. – № 5. – С. 9-13.
7. Жданов А.А. Сравнительный анализ существующих методов для отделки поверхностей деталей гидротопливных агрегатов // *Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве // 7-я междунар. научно-техн. конф.* 27-28 мая, 2003 г. – X. – 2003. – С. 69-74.
8. Миятани Т. Удаление микрозаусенцев с точных деталей // *Кикай гидзюцу*. – 1980. – Т. 28, № 8. – С. 43-50 (перевод № Г-34270).
9. Мита К. Удаление микрозаусенцев с миниатюрных точных деталей // *Кикай гидзюцу*. – 1980. – Т. 28, № 8. – С. 60-64, 55 (перевод № Г-34271).
10. Новичков Б.М. Автоматизированный анализ чистоты авиационного топлива // *Авиационная промышленность*. – 1999. – № 3. – С. 16-20.
11. Тимиркеев Р.Г., Плихунов В.В., Губин Н.Н. Количественные зависимости влияния параметров механических примесей на показатели надежности золотниковых агрегатов гидротопливных систем // *Авиационная промышленность*. – 2000. – № 3. – С. 102-105.
12. Новые технологические процессы и надежность ГТД: Производственно-технический сборник. Отчет КМПО "Труд" по прочности и технологической доводке изделий. – М.: ЦИАМ, 1990. – № 52. – 175 с.
13. 6th International Conference "Precision Surface Finishing and Deburring Technology-2000". – Saint-Petersburg, 2000. – 363 p.
14. Васильков Д. В., Печенюк Д.Ю. Эффективность использования международных стандартов при контроле микрогеометрии поверхностей деталей // *Инструмент*. – С.-Пб. – 1998. – С. 6-7.
15. Исследования по назначению оптимальной шероховатости поверхностей деталей гидромашин: Отчет № ГР. 01880035081. – X., 1988. – 63 с.

Поступила в редакцию 7.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.