
УДК 620.178.76 : 621.891

Канд. техн. наук С. Н. Попов, С. В. Андриенко
Национальный технический университет, г. Запорожье

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗНАШИВАНИЯ И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА АБРАЗИВНОГО РАЗРУШЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ БАРОВЫХ МАШИН

Исследован механизм разрушения поверхности трения рабочего инструмента баровой машины. Усовершенствована и апробирована методика промышленных испытаний натурных образцов. Проведен трибоматериаловедческий анализ характера изношенной поверхности детали. Представлено описание влияния внешних параметров трибосистемы на интенсивность изнашивания и работоспособность резцов.

Ключевые слова: абразивное изнашивание, поверхность трения, резец, механизм разрушения, линейный износ, асфальтобетонное покрытие, абразивная частица.

Введение

Рабочие органы дорожно-строительных машин и, в частности, резцы бар, работают в сложных условиях интенсивного абразивного изнашивания, что приводит к значительному их износу и преждевременному снижению работоспособности. При этом изменение геометрических размеров инструмента обуславливает снижение их разрушающей способности и приводит к повышенному расходу потребляемой мощности машины на разрушение асфальтобетона, что значительно снижает эффективность работы баровой установки.

Поэтому целью данной работы было исследование и анализ характера разрушения баровых инструментов и разработка рекомендаций по повышению их срока службы путем оптимизации геометрической формы резца и последующей разработке технологии его изготовления.

Анализ литературных данных

Баровые машины применяют для нарезки щелей в асфальтобетонных и других покрытиях при рытье траншей. Баровая машина предназначена для резки бетона и асфальтобетона, а также используется практически для обработки всех видов грунтов: мерзлого, глины, известняка, ракушечника, большинства скальных пород. При интенсивной работе (5–6 часов машинного времени) в асфальтобетоне режущий инструмент баровой машины требует практически ежедневной замены. По данным [1], в зависимости от вида грунта рабочие органы могут изнашиваться за 1...4 смены работы, что составляет 8–32 часов машинного времени.

Основоположниками при изучении изнашивания материалов в абразивных средах являлись И. В. Крагельский, Б. И. Костецкий, В. Н. Ткачев, П. Н. Львов, В. С. Попов, Н. Н. Брыков. В своих работах они показали, что материал, подвергающийся абразивному изнашиванию, в частности, по мнению И. В. Крагельского, основным процессом, вызывающим изнашивание, является повторное деформирование поверхностного слоя абразивными зернами, в результате чего в одних и тех же объемах вследствие «передеформирования» возникают усталостные трещины и происходит хрупкое отделение частиц металла; П. Н. Львов считает, что изнашивание абразивными частицами происходит за счет пластических деформаций поверхностных слоев металла. Металл, выдавленный в валики по краям царапины, пластически образованной абразивным зерном, удаляется при последующем прохождении абразивных зерен; В. Н. Ткачев выделяет три основных вида разрушения поверхности металла при взаимодействии с абразивной массой: микрорезание, многократное деформирование и коррозионно-механический износ, отмечая, что изнашивание рабочих органов почвообрабатывающих машин связано, главным образом, с передеформированием поверхностных слоев металла; согласно М. М. Хрущову М. А. Бабичеву, механизм абразивного изнашивания происходит при царапании поверхности дета-

ли абразивными зернами, большая часть которых оставляет пластически выдавленный след, а остальные осуществляют микрорезание и снимают мельчайшую стружку.

В то же время необходимо отметить, что современные исследования процессов изнашивания дополняют ранее проведенные исследования и в основном содержат только особенности и уже известные общие закономерности разрушения поверхности трения. Так, в частности, в работе V. Jankauskas с коллегами [2, 3], которые занимались вопросами по изучению механизма изнашивания плужных лемехов, указывается, что не все известные механизмы абразивного изнашивания полностью отражают износ почвообрабатывающих органов в почве. По их мнению, одновременно действуют такие виды износа, как: износ в абразивной массе, износ вклинившимися абразивными частицами, ударно-абразивное изнашивание. Кроме того, повторяются уже опубликованные [4, 5] методологические основы выбора основных факторов, оказывающих влияние на способность сплавов к сопротивлению изнашиванию, в частности: структуры и природы материала инструмента, абразива и его твердости, влажности, размеров и формы абразивных частиц, их подвижности и скорости движения, давления поверхности на абразивную частицу.

Согласно проведенным исследованиям работы [6], абразивный процесс в зависимости от соотношения твердостей абразива и материала детали, имеет две формы проявления: 1) при $H_a < kH_M$ происходит механо-химическое разрушение поверхности, 2) при $H_a > kH_M$ наблюдается преимущественно механическое разрушение.

Согласно работе [7], механизм абразивного изнашивания заключается в удалении материала из изнашиваемой поверхности либо в виде очень мелкой стружки, или фрагментов разрушенного материала, предварительно выдавленного по сторонам пластически деформированной царапины, либо в виде мелких кусочков, хрупко отделяющихся при однократном или многократном воздействии.

В ряде работ [8, 9], абразивный износ подразделяется на категории: 1) абразивное изнашивание закрепленным абразивом; 2) абразивное изнашивание незакрепленным абразивом; 3) ударно-абразивное изнашивание. Также рассматриваются следующие виды разрушения при абразивном изнашивании в зависимости от условий взаимодействия абразивной частицы с поверхностью детали: 1) микропропахивание – образование канавок на поверхностях металла при взаимодействии с абразивными частицами; 2) микрорезание – снятие стружки частицами абразива, имеющими острые грани; 3) микрорастрескивание – характерно для хрупких твердых материалов; 4) микроусталость – наблюдается повторном пропахивании, когда округленное зерно при взаимодействии с пластичным материалом детали не способно осуществлять микрорезание,

приводя при многократном воздействии к пластическому деформированию материала.

Однако имеются данные [10], что действие абразивных частиц на поверхностях трения проявляются в двух основных механизмах: 1) абразивные частицы, совершая микрорезание, оставляют на металле множество царапин; 2) деформационное действие частиц, которые производят не царапание поверхности, а выдавливание лунок или бороздок. При многократном действии наблюдаются усталостные разрушения.

В работе [11] приведены данные о типах инструментов, применяющихся на баровых установках, геометрические параметры резцов, однако большее внимание уделено поломкам армирующих вставок, находящихся на передних режущих кромках резцов и форме пластины. Установлено, что наиболее прочными являются пластины с выпуклой передней поверхностью и округлой формой режущей кромки, а основными видами поломок резцов являются поломки и изгибы державок. Чаще всего они происходят или на рабочей части резца, у торца вставки твердого сплава, или у места крепления в кулаке (переход к хвостовику); поломка режущей кромки вставки или самой вставки; разрыв паяного соединения.

В своих работах С. Н. Попов с учениками [5, 12] исследовали влияние внешних условий изнашивания резцов дорожных фрез на износостойкость в схожих условиях абразивного изнашивания и доказали, что оптимизация геометрической формы детали может изменять механизм разрушения поверхности трения.

Таким образом, анализ априорной информации показал, что на сегодняшний день механизм разрушения рабочих инструментов бар, работающих в грунте или асфальтобетоне, практически не изучен. В литературе имеются отрывочные несистематизированные сведения об условиях изнашивания баровых инструментов, которые не учитывают в комплексе триболоматериаловедческие параметры конкретных условий разрушения резцов. Поэтому задача выявления основных закономерностей механизма разрушения резцов и определение путей повышения их срока службы является весьма актуальной и своевременной.

Методика проведения исследований

Испытания проводили в промышленных условиях на натуральных резцах в регламенте действующего производственного цикла на баровых установках на базе трактора МТЗ-82 с режущим органом «Урал-33» с резцами РП-3. Эксплуатационные характеристики были следующими: температура окружающей среды составляла 15–18 °С, прочность асфальтобетона при одноосном сжатии 1,5–7,0 МПа, применяемая марка асфальтобетона (асфальтобетон мелкозернистый плотный, тип А, I марки) отвечала свойствам и характеристикам ГОСТ 9128-97. Состав данной марки асфальтобетона: песок, щебень (50–60 %) фракции 5–20 мм, минеральный порошок, битум БНД 60/90. Угол наклона рабочей цепи

составил 60–65 °, скорость резания 2,5–3,5 м/с; скорость подачи 3–4 м/мин.

После проведения испытаний, натурные резцы очищались от грязи мягкой металлической щеткой (ГОСТ 28638-90), промывались раствором ацетона (ГОСТ 2768-84) и протирались ветошью (ГОСТ 4643-75) насухо.

Изменение линейного износа резцов по высоте проводили с помощью штангенциркуля ШЦ-1-125-0,1 ГОСТ 166-89, приспособление для зажима резца (см. рис. 1), которые позволяют установить величину линейного износа от базовой поверхности.

Величина линейного износа вычислялась как разность замеров в разных точках изнашиваемой поверхности детали до и после испытаний:

$$\Delta L = l_0 - l_1, \quad (1)$$

где ΔL – величина линейного износа, мм;

l_0 – линейный износ резца до испытания, мм;

l_1 – линейный износ резца после испытания, мм.

Для проверки статистической погрешности измерений, осуществляли не менее 3 измерений в одной точке. Относительную погрешность определяли согласно [13] формуле:

$$E = \frac{\Delta x}{x_{cp}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где Δx – абсолютная погрешность, x_{cp} – среднее значение измеряемой величины.

Относительная погрешность E составила 0,2–0,4 %.

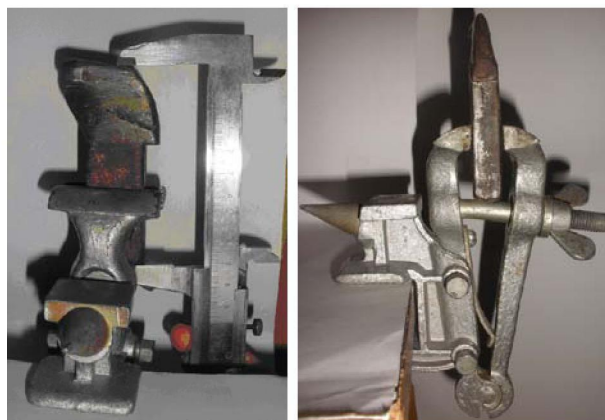


Рис. 1. Способ замера линейного износа плоских резцов баровой машины

Исследование и анализ механизма разрушения поверхности трения барового резца

Рабочий инструмент машины представляет собой цепные бары от врубных машин или комбайнов, состоят из клéпаной или сварной конструкции, которая включает в себя нижнюю (1) и верхнюю (10) плиту и продольные брусья (8) (рис. 2).

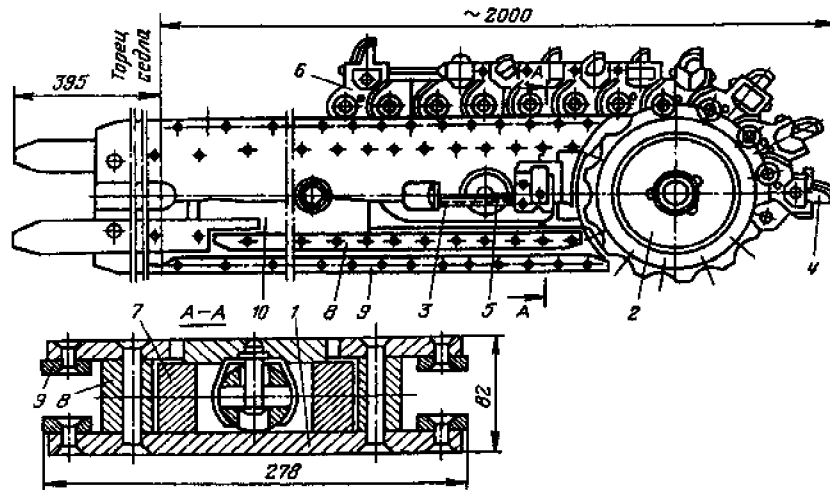


Рис. 2. Плоский цепной рабочий орган врубной машины [14]

Вместе с накладками (9) такая конструкция образует направляющий ручей, в котором располагается режущая цепь (6), оснащенная резами (4). Движущаяся по раме цепь контактирует с асфальтобетоном, разрушая его, а поступательное движение баровой машины вперед приводит к образованию на его поверхности траншеи.

Резец РП-3 (рис. 3) представляет собой стержень, состоящий из головки 2, армированной пластинкой из твердого сплава ВК-8 (3) и державки (стержня) (1) для крепления на исполнительном органе. Головка резца РП-3 является режущей составляющей инструмента.

Резцы в кулаках закрепляются стопорными винтами. Наибольший угол наклона рабочей цепи составляет 60–65°. Скорость рабочей цепи экскаваторов составляет 2,5–5 м/с. В настоящее время в Украине рабочие органы дорожно-строительных машин изготавливаются из легированных сталей типа 40Х, 40СГ, 50Г, 65Г, 35ХГТ, 35ХГ2, имеющие твердость в закаленном состоянии в пределах 38...45 HRC. В условиях трения о грунт или асфальтобетон такие материалы показывают невысокую износостойкость [15], что связано с тем, что

твердость абразивной частицы превышает в 1,5–2 раза твердость материала детали. Резцедержатели (кулаки) изготавливают из стали типа 40Х, 40ХН, для изготовления резцов используют легированные стали после закалки – 35ХГСА [15, 16].

Анализ гранулометрического состава показал, что слой асфальтового бетона в основном состоит из граничных абразивных и песчаных частиц разной фракции, связанных битумной связкой. Гранулометрический анализ показывает, что микротвердость H_{50} абразивных материалов в данных условиях изнашивания составляет от 13,5 ГПа до 16,8 ГПа, при этом предел прочности при сжатии гранита $\sigma_{сж}$ = 10–30 ГПа, песка $\sigma_{сж}$ = 4–8 ГПа. Фракции: менее 5 мм, 5–10 мм, 10–20 мм, 20–40 мм, составляют примерно 36,6...70,8 % почвы (рис. 4) [4].

В состав гранита входит кварц, полевые шпаты, слюды, иногда роговая обманка или авгит. Размер зерен песка SiO_2 может составлять от 0,16 до 5 мм, гравия от 5 до 70 мм и более. В редких случаях при работе бар с высокопрочными гранитами или диабазами твердость абразива может достигать от 22 ГПа. Причем, по дан-

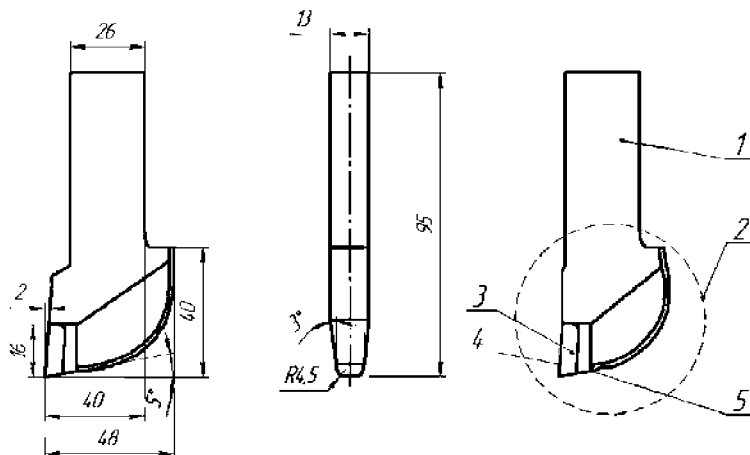


Рис. 3. Основные геометрические параметры и общий вид плоского баровогорезца РП-3

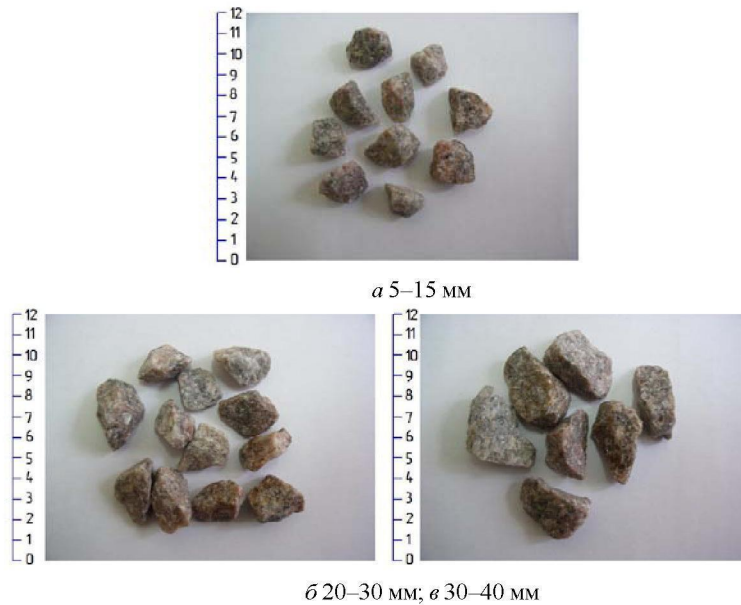


Рис. 4. Фракции гранитных частиц, содержащиеся в асфальтобетоне

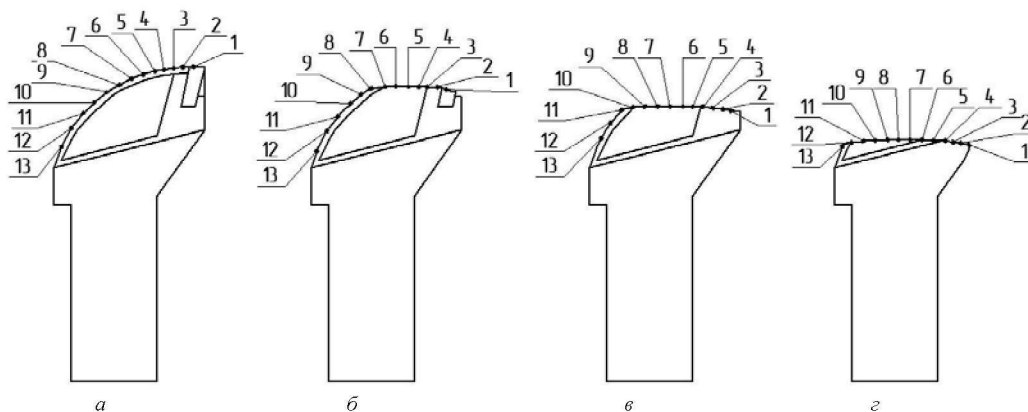


Рис. 5. Характер износа плоских резцов бары после эксплуатации: а – новый резец; б – резец после 100 м в асфальтобетоне; в – резец после 200 м в асфальтобетоне; г – резец после 300 м в асфальтобетоне

Таблица 1 – Результаты замеров линейного износа баровых резцов

Линейный износ	№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	ΔL_2 , мм	9	8	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0
	ΔL_3 , мм	14	13	12	10	9	8	6	5	3	1	0	0	0
	ΔL_4 , мм	29	26	23	21	20	18	14	12	11	9	8	6	0

ным работы [17] указывается, что наибольшей абразивной способностью, как правило, обладают твердые абразивные частицы, размер которых находится в диапазоне от 0,5 до 2 мм. Важное значение имеет форма абразивных частиц: округлой и угловатой с острыми гранями и выступами, поскольку при достаточной твердости и прочности они способны деформировать, резать и изнашивать контактные поверхности деталей рабочих органов.

Процесс изнашивания резца включает в себя несколько различных механизмов контактного взаимодействия, которые имеют различные характеристики и действуют одновременно и во взаимодействии друг с другом. Проведенные нами исследования характера изнашивания баровых резцов позволили установить изменение линейного износа резцов по высоте (рис. 5, 6) и построить эпюры износа в зависимости от пройденного пути трения (рис. 6, таблица 1).

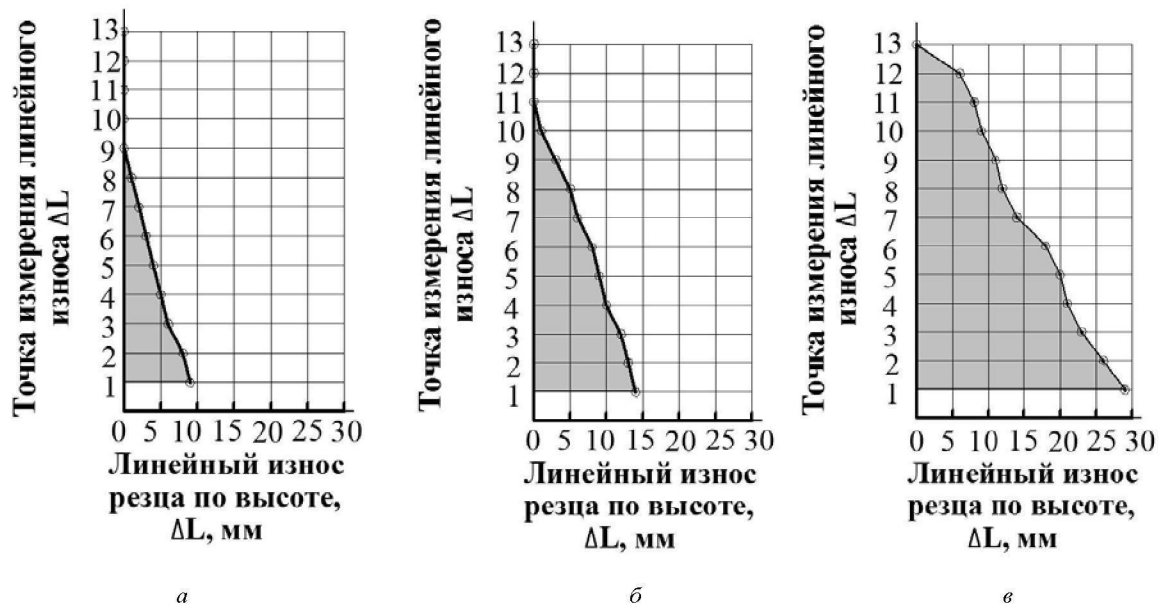


Рис. 6. Эпюры износа барового резца:

a – для резца (после 100 м); *б* – для резца (после 200 м); *в* – для резца (после 300 м)

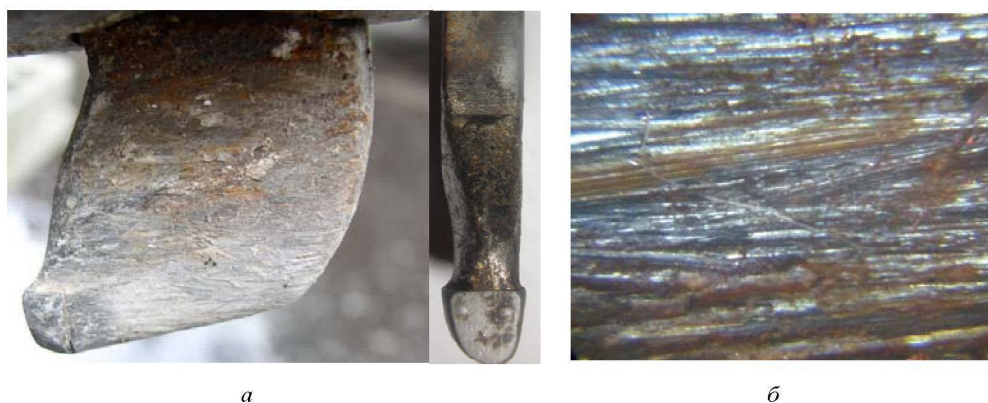


Рис. 7. *a* – характер разрушения поверхностей рабочей части резца после эксплуатации в асфальтобетоне 16 машино-часов работы; *б* – поверхность трения резца (× 30)

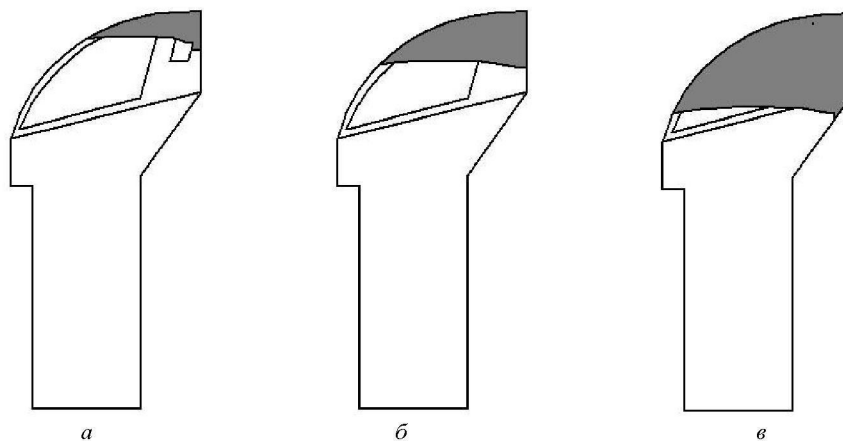


Рис. 8. Потеря линейного размера резца по высоте: *a* – 9,5 %; *б* – 14,7 %; *в* – 20,5 % от длины резца

Анализ графоаналитических эпюр износа резцов (рис. 6) показал, что наиболее интенсивно изнашивается передняя и задняя поверхность инструмента. Это связано с тем, что при его эксплуатации в зоне передней поверхности рабочего органа образуется уплотненное ядро из абразивной массы, по мере прохождения резца масса перемещается под его заднюю грань (рис. 7, а). Установлено, что интенсивному изнашиванию подвержены передняя, задняя грани, а также боковые поверхности резца (рис. 7, б). В результате работы резцов линейный износ по их высоте увеличивается (рис. 8), уменьшаются геометрические размеры резца и его масса.

Анализ поверхностей трения (рис. 7) показал, что преобладающим видом разрушения рабочих органов бар является абразивное изнашивание, при котором закрепленные абразивные частицы контактируют с поверхностью резца. Наличие на изнашиваемой поверхности одновременно участков со следами микроцарапин, пластически оттесненных участков и следов коррозионного воздействия свидетельствует о комплексном контактном взаимодействии: одноцикловом разрушении, отделении микрообъемов металла за счет многократного пластического усталостного деформирования с образованием канавок и навалов, а также наличием коррозионного воздействия.

Выводы

Таким образом, представленные исследования позволили установить следующее.

1. Показано, что режущие инструменты баровых машин работают в сложных условиях контактного взаимодействия, что связано, в данном случае, с присутствием одновременно нескольких механизмов изнашивания резца:

а) наличие локальных ударных нагрузок на начальном этапе и при дальнейшей работе рабочего инструмента; б) действие закрепленного и полужакопленного абразива при заглоблении режущей цепи с резцами; в) действие незакрепленного абразива при выходе резцов из абразивной среды.

2. Установлено, что преобладающим видом разрушения рабочих боковых поверхностей органов бар является абразивное изнашивание. В то же время наличие на изнашиваемой поверхности одновременно участков со следами микроцарапин, пластически оттесненных участков и следов коррозионного воздействия свидетельствует о комплексном контактном взаимодействии: одноцикловом разрушении, отделении микрообъемов металла за счет многократного пластического усталостного деформирования с образованием канавок и навалов, а также наличием коррозионного воздействия.

3. Усовершенствована и апробирована новая методика промышленных испытаний натуральных резцов бар. Построены эпюры линейного износа резцов в зависимости от пути трения. Установлено, что максимальная интенсивность изнашивания зафиксирована на пере-

дней, задней гранях и боковой поверхности. Показано, что преждевременный износ на передней и задней поверхностях инструмента приводят к затуплению режущей кромки, изменению геометрических параметров резца, повышению сил резания и, следовательно, понижению производительности работы баровой машины.

4. Графоаналитический анализ эпюр износа резцов после испытаний в условиях действующего производственного цикла позволил установить, что после работы резца в асфальтобетоне в пределах пути трения 250–300 м зафиксирован максимальный линейный износ инструмента по высоте (30 мм от общей длины резца 95 мм, что составляет около 30 %). При этом следует отметить, что на производстве допускают неоправданно критическое значение максимального износа инструмента, что является недопустимым, поскольку от 60 % до 40 % машинного времени режущий бары работает в условиях катастрофического разрушения.

Исходя из вышеизложенного, для повышения срока службы баровых резцов можно рекомендовать проведение дальнейших исследований:

- 1 – по разработке критериев оценки работоспособности и выбраковки рабочих органов;
- 2 – в дальнейшем по разработке схем оптимизации геометрической формы резца;
- 3 – по разработке технологии наплавки и оптимально легированного износостойкого наплавочного материала для конкретных условий абразивного изнашивания деталей баровых машин.

Список литературы

1. Кузнецова В. Н. Развитие научных основ взаимодействия контактной поверхности рабочих органов землеройных машин с мерзлыми грунтами: автореферат дис. ... доктора технических наук. 05.05.04 Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины» / В. Н. Кузнецова. – Омск, 2009. – 54 с.
2. Jankauskas V. Strengthening machine elements working under abrasive environment by alloying with hard layers and their estimation / V. Jankauskas // *Mechanika*. – 2006, № 1(57). – P. 55–60.
3. Jankauskas V. Research of strengthening plough parts by welding / V. Jankauskas, R. Kreivaitis, D. Stonkus, A. Andriulis // *Mechanika*. – 2008. – № 1 (69). – P. 80–84.
4. Попов С. М. Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні: Навчальний посібник / С. М. Попов, Д. А. Антонюк, В. В. Нетребко. – Запоріжжя: ЗНТУ, АО «Мотор Січ», 2010. – 368 с.
5. Попов С. Н. Влияние трибоматериаловедческих параметров на характер разрушения резцов дорожной фрезы в условиях изнашивания закрепленным абразивом / С. Н. Попов, Д. А. Антонюк // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2006. – № 2. – С. 77–84.
6. Денисенко М. І. Структурно-енергетичні основи управління тертям та зношуванням в машинах за наявності вільного абразиву / М. І. Денисенко // *Науковий вісник НУБІП України*. – 2011, Вип. 166. – Ч. 1. – С. 131–139.

7. Абразивная стойкость наплавленного металла, содержащего карбиды титана / [А. И. Любич, Т. П. Говорун, А. С. Галагуз, В. В. Дудченко] // Вісник СумДУ. 2011, № 1. – С. 124–128.
8. Stachowiak G. W. Engineering tribology (2nd ed.) / G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor, 2000. – 769 p.
9. Graff L. Discrete element method simulation of wear due to soil-tool interaction: a thesis... master science: Agricultural and Bioresource Engineering / Lyndon Graff. – Saskatoon, Canada, 2010. – 120 p.
10. Беркович И. И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский. – Самара, 2000. – 268 с.
11. Горные машины и оборудование подземных горных работ. Режущий инструмент горных машин: учеб. пособие / [А. А. Хорешок, Л. Е. Маметьев, А. М. Цехин, А. Ю. Борисов]. – Кемерово, 2012. – 288 с.
12. Попов С. Н. Исследование влияния внешних условий изнашивания на износостойкость резцов дорожной фрезы / С. Н. Попов, Д. А. Антонок // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 1. – С. 25–29.
13. Ипполитова Г. К. Ошибки измерений физических величин. Методические указания к лабораторному практикуму по физике / Г. К. Ипполитова, И. Л. Скворцова. – М. : МАДИ, 2010. – 9 с.
14. Топчиев А.В. Горные машины и комплексы / [А. В. Топчиев, В. И. Ведерников, М. Т. Коленцев и др.]. – М. : Недра, 1971. – 560 с.
15. Мультианов А. С. Разработка твердосплавного режущего инструмента для разрушения прочных и абразивных горных пород: дис. ... канд. техн. наук: спец. 25.00.20 «Геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» / А. С. Мультианов. – Москва. – 2004. – 122 с.
16. Вартанов С. Х. Зарубежные траншейные экскаваторы / С. Х. Вартанов // Строительные и дорожные машины. – № 8. – 1988. – С. 11–13.
17. Закономірності взаємодії різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин з ґрунтом / [М. І. Черновол, В. В. Аулін, В. М. Бобрицький, А. А. Тихий] // Вісник інженерної академії України, 2008. – № 3–4. – 196 с.

Одержано 09.01.2013

Попов С.М., Андрієнко С.В. Дослідження характеру зношування та аналіз механізму абразивного зношування робочих органів барових машин

Досліджено механізм руйнування поверхні тертя робочого інструменту барової машини. Удосконалена та апробована методика промислових випробувань натурних зразків. Проведено трибоматеріалознавчий аналіз характеру зношеної поверхні деталі. Представлено опис впливу зовнішніх параметрів трибосистеми на інтенсивність зношування та працездатність різців.

Ключові слова: абразивне зношування, поверхня тертя, різець, механізм руйнування, лінійний ізнос, асфальтобетонне покриття, абразивна частка.

Popov S., Andrienko S. Investigation of wear behavior and analysis of abrasive failure mechanism of the operating tools of bar machine

The fracture mechanism of friction surface of the operating tool of the bar machine is investigated. The technique of industrial tests of full-scale specimens are improved and approved. Tribo-science of materials analysis of the nature of the worn surface of component is carried out. The description of the influence of external parameters of tribosystem on the wear rate and performance of the cutter picks.

Key words: abrasive wear, friction surface, cutter pick, failure mechanism, linear wear, asphaltic concrete, abrasive particle.