

Математическое моделирование критериев работоспособности при изнашивании рабочих органов дорожных фрез

С. Н. ПОПОВ

Запорожский национальный технический университет

Разработана математическая модель, отображающая влияние площади удаленного асфальтобетона на работоспособность резцов, установленных в различных участках барабана дорожной фрезы.

Розроблена математична модель, що відображує вплив площі видаленого асфальтобетону на працездатність різців, що встановлені в різних ділянках барабану дорожньої фрези.

Mathematical model of influence of area of remote bituminous concrete on the capacity of the chisels set in the different areas of road milling drum.

Введение. В Украине вопрос ремонта асфальтобетонных слоев дорожных покрытий является чрезвычайно актуальным. Удаление старого асфальта обеспечивает практически неограниченное количество сырья для регенерации, что главным образом определяет низкую себестоимость вторично-го покрытия. Для этих целей на сегодняшний момент широко применяются дорожные фрезы марок Wirtgen (Германия), Caterpillar, Roadtec (США), СМІ Terex (США), Bitelli (Италия), Брянский арсенал (Россия). Рабочий орган, осуществляющий удаление слоя изношенного асфальтобетона, представляет собой барабан с закрепленными на нем резцами (72-150 шт).

Потеря эксплуатационных свойств, определяющих работоспособность резцов, связана с затуплением режущей кромки и износом корпуса резца в результате одновременного протекания нескольких видов изнашивания. Доминирующим среди них является абразивное разрушение с наличием локальных ударных нагрузок, которые обуславливают отрыв микрообъемов металла за счет хрупкого растрескивания поверхностного слоя инструментального материала и усталостного разрушения.

Анализ публикаций. По мнению многих исследователей [1-16], основные факторы, влияющие на характер и интенсивность изнашивания режущего инструмента можно разделить на три группы:

- геометрия трущихся поверхностей и характер их взаимного контакта (сцепление частиц породы на поверхности материала резца);
- свойства материала инструмента (твердость, состав и содержание матрицы, а также форма, размеры, морфология и дисперсность упрочняющей фазы);
- физико-механические свойства асфальтобетона.

Как отмечено в ряде работ [10-12], изнашивание режущего инструмента определяется случайным характером взаимодействия контактных площадок резцов фрезы с обрабатываемым материалом, временной не-

стабильностью термомеханических процессов, неоднородностью свойств инструментального и обрабатываемого материалов и т.д.

Цель исследований. Целью исследования является:

- определить привалирующий механизм изнашивания и сопутствующие процессы;
- определить критерии работоспособности рабочих органов дорожных фрез.
- разработать математическую модель влияния площади удаленного асфальтобетона на работоспособность резцов.

Изложение основных результатов. При исследовании зависимости работоспособности и срока службы резца фрезы можно выделить следующие участки: приработки, изнашивания с постоянной скоростью или установившегося износа, форсированного разрушения или интенсивного прогрессирующего износа [14, 15]. Уменьшение размеров при разрушении резца происходит дискретно по поверхности трения и во времени. Разрушение наконечника резца пропорционально площади удаленного асфальтобетона. Согласно модели изнашивания в каждый момент времени разрушение оценивается углом наклона кривой изнашивания:

$$V = \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где α – угол наклона кривой изнашивания в каждый момент времени.

Характер изменения величины износа свидетельствует о наличии небольшого участка приработки, при фрезеровании до 1000 м² асфальтобетона (табл. 1). На данном этапе происходит стабилизация режимов трения и изнашивания, изменяется микрогеометрия поверхности, обеспечивая более равномерное распределение нагрузки по контурным площадям контакта. Приработка характеризуется выглаживанием поверхности в направлении движения, стабилизацией сил трения и интенсивности изнашивания.

Таблица 1. Изнашивание резца по высоте в зависимости от площади фрезерования дорожного полотна

| Линейный износ наконечника резца, мм | Площадь удаленного асфальтобетона, м ² |
|--------------------------------------|---|
| I | II |
| 0 | 0 |
| 0,2 | 1000 |
| 2,2 | 1450 |

| I | II |
|------|------|
| 4,2 | 2700 |
| 6 | 3500 |
| 7,1 | 4700 |
| 10,7 | 5700 |

В табл. 1 представлены изменения износа наконечника реза для фрезы W500. На этапе установившегося режима изнашивания (1000-5700 м²) линейный износ резов по длине практически пропорциональный площади удаленного асфальтобетона. Изменение характера разрушения (5700-6000 м² удаленного асфальтобетона) связано с уменьшением способности к внедрению реза при прогрессирующем изнашивании.

Срок службы реза при эксплуатации в условиях абразивного изнашивания с наличием локальных ударных нагрузок определяется комплексом эксплуатационных параметров технологического производства, выход за пределы которых снижает качество выполняемой операции фрезерования, площадь снимаемого асфальтобетона, вызывает повышение энергетических затрат, увеличивает возможность появления аварийной ситуации, которая может привести к выходу из строя всей дорожной фрезы.

Основными критериями, определяющими срок эксплуатации реза дорожной фрезы, являются [14]:

1. Потеря заданных геометрических размеров ($\Delta h = 10,5-12,0$ мм; $\Delta d = 11-14$ мм).
2. Снижение заданных прочностных характеристик, как самой детали, так и узла крепления ($\sigma_b \leq 450$ МПа, $HRC_{корп.} < 3,0$ ГПа, $HRC_{нак.} < 20,0$ ГПа).
3. Появление необратимых процессов разрушения – усталостные, механические явления, обусловленные развитием макро- и микротрещин и т.п.

4. Комплексные (смешанные).

Переход реза в нерабочее состояние, т.е. потеря работоспособности (P), может происходить следующим образом (рис. 1).

1. Переменно-постоянный или нормальный характер износа показан на рис. 1. Данная зависимость характерна для рабочих органов, имеющих определенный интервал первоначального формирования поверхности и формы (S_n) – период приработки, составляющий в среднем 1000-1500 м² выработанного асфальтобетона. Участок а-б кривой 1 обусловлен сниженным уровнем износа. Участок б-в имеет характер установившегося износа (S_y), период работы реза в этом режиме должен быть основным и в несколько раз превышать другие периоды эксплуатации. Это связано с тем, что к моменту окончания начального износа (точка б) формируется установившийся процесс изнашивания и достигается максимальное значение работоспособности детали. Заключительный участок в-д зависимости 1 соответствует периоду интенсивного прогрессирующего износа (S_{np}). В этом интервале за счет изменения геометрии и формы детали происходит выход технологических параметров эксплуатации в жесткий режим изнашивания, при котором к основным – главным причинам можно отнести:

- а) увеличение диаметра наконечника реза и его укорочение, вследствие чего энергия, необходимая для проникновения значительно возрастает;

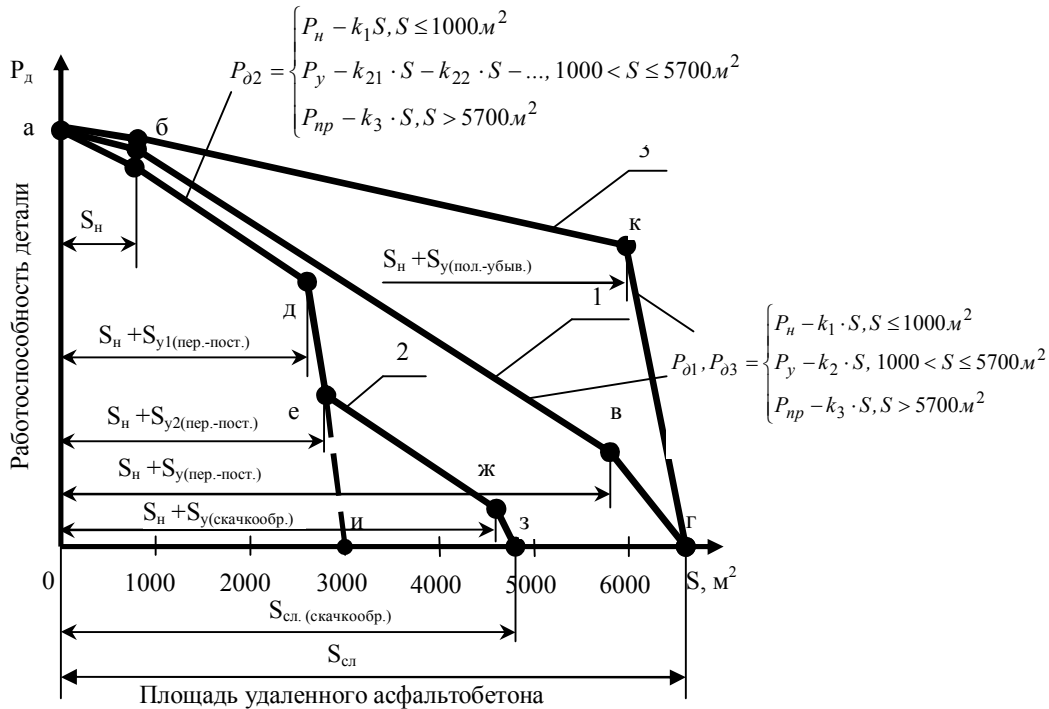


Рис. 1. Зависимость работоспособности (P_д) от площади удаленного асфальтобетона (S) реза дорожной фрезы в условиях абразивного изнашивания с наличием локальных ударных нагрузок

б) попадание инородных абразивных тел во взаимодействие реза с дорожным покрытием, находящихся на поверхности дороги.

Площадь удаленного асфальтобетона за весь срок службы реза дорожной фрезы, работающего в таком режиме определяется:

$$S_{сл} = S_n + S_y + S_{np} \quad (2)$$

при условии, что:

$$\begin{cases} S_y \geq n(S_n + S_{np}); \\ n \geq 2, \end{cases} \quad (3)$$

где S_n - начальный интервал изнашивания,

$S_n = 1000-1500 \text{ м}^2$ удаленного асфальтобетона;

S_y - интервал установившегося изнашивания,

$S_y = 4500-5000 \text{ м}^2$ удаленного асфальтобетона;

S_{np} - интервал прогрессирующего изнашивания,

$S_{np} = 300-1000 \text{ м}^2$ удаленного асфальтобетона;

n - показатель эксплуатационной устойчивости [14].

Расчеты показывают, что

$$4500 - 5000 \geq n(1300 - 2500),$$

показатель эксплуатационной устойчивости реза дорожной фрезы составляет $n = 2 - 3,5$.

При этом критериальное ограничение работоспособности, обуславливающее такой период работы резов, за который возможно профрезеровать $S_{сл} \text{ м}^2$ асфальтобетона будет определяться следующими зависимостями:

$$S_{сл} = f(\Delta l^P, \alpha_{кр}^P, \Delta d^P), \quad (4)$$

где $\alpha_{кр}^P$ - показатель работоспособности, показывает максимальный критический угол резания, ограничивающий способность внедрения наконечника реза в асфальтобетонное покрытие. При достижении значения определенного критического угла $\alpha_{кр}$, приводу фрезы необходимо затрачивать все большее количество энергии для проникновения резов в покрытие, при этом эффективность и КПД фрезерования падает. Таким образом $\alpha_{кр}^P = f(\alpha_{кр}, P, \eta)$.

Δl^P - показатель работоспособности, ограничивающий максимальный линейный износ реза по высоте. Определяется как функция - $\Delta l^P = f(\Delta l_n, \Delta l_k)$, где Δl_n - критический линейный износ наконечника реза, при котором теряется работоспособность детали.

Δd^P - показатель работоспособности, ограничивающий линейный износ наконечника и корпуса реза по диаметру в сечениях. $\Delta d^P = f(\Delta d_n, \Delta d_k)$, где Δd_n и Δd_k - критический износ наконечника и корпуса реза по сечениям в диаметре.

Результаты промышленных исследований показывают, что режущая кромка реза опускается от первоначального положения на 6-10 мм, что приводит к увеличению угла резания на 14-25°. Исследования после эксплуатации показали, что корпус изнашивается интенсивнее в районе наконечника, формируя фаску износа. Такой характер износа наконечника и корпуса можно объяснить тем, что основная часть сопротивления асфальтобетона резанию приходится на конец реза

и его боковые поверхности, которые, прежде всего, внедряется в покрытие и находится под наибольшим давлением. По мере удаления от режущей кромки поверхность реза подвергается воздействию более разрыхленного асфальтобетона. Поэтому достижение критических величин $\alpha_{кр}$, Δl_n , Δd_n , Δd_k вызывает смещения рабочей кромки в более расширенную зону, что обуславливает большие энергетические затраты, связанные с увеличением величины давления для проникновения в дорожное покрытие. Статистические исследования 5 групп отработанных резов показывают, что по данному характеру изнашивается порядка 50-60% резов, располагающихся в центральной части барабана.

2. Скачкообразный характер износа реза (кривая 2, рис. 1). В данном случае также наблюдается интервал а-б начального и б-д установившегося износа. В случае попадания абразивных частиц между резцом и резцедержателем, происходит его заклинивание. При этом резец изнашивается в одной плоскости. Происходит потеря работоспособности детали (участок д-е, кривая 2 рис. 1). В случае своевременного очищения зазора между резцедержателем и резцом возможна дальнейшая эксплуатация (участок е-ж), однако эффективность фрезерования значительно снижается. В ином случае резец выходит из строя (е-и, кривая 2). Аналогичный характер износа (а-б-д-е-и, кривая 2, рис. 1) наблюдается в случае попадания наконечника на металлическое включение в слое асфальтобетона. При этом происходит откол твердосплавной вставки. Доля выходов из строя резов по такому механизму составляет около 12-15%.

3. При полого-убывающем характере потери работоспособности (кривая 3, рис. 1) также наблюдается период начального износа а-б, кривая 3. Дальнейшее поведение кривой - участок б-к - равномерно-убывающее, однако с меньшим наклоном, по сравнению с переменнo-постоянным. Такой характер износа наблюдается (14-17% от общего количества резов) в случае, когда резец работает в условиях высокой вязкости асфальта, его корпус изнашивается интенсивнее наконечника. Вследствие этого корпус не может удержать наконечник и резец разрушается (участок к-г кривой 3, рис. 1). Резцы, размещенные по краям барабана фрезы, также имеют характерную форму износа корпуса реза, вследствие отсутствия теневого эффекта на поверхности барабана. Потеря работоспособности связана в основном с отколом твердосплавной вставки от режущего инструмента в результате утонения места крепления.

Изнашивание взаимно перемещающихся твердых тел представляет стохастический (динамический) процесс, интенсивность протекания которого обусловлена переменными нагрузками, непостоянством физико-механических свойств контактирующих тел, скоростью и температурой трения и др. Вероятностная природа изнашивания инструмента в условиях резания связана с взаимным влиянием абразивных и усталостных явлений в зоне контакта, которое проявляется в их сложной взаимосвязи. Степень влияния того или иного физико-химического явления зависит от материала инструмента и асфальтобетонного покрытия, параметров режима резания и геометрии инструмента, условий охлаждения и т.д.

Таким образом, в общем случае можно представить вероятность α_n , с которой за время τ будет достиг-

нута некоторая величина износа резца Δl : $\alpha_H = \alpha(\tau, \Delta l)$.

Вероятность того, что за время τ работы резца дорожной фрезы величина его износа не превысит предельную величину $\Delta l \leq [\Delta l]$, является функцией скорости резания V , температуры в зоне контакта T и давления изнашивающей среды P [2]:

$$\alpha_H = f(V, T, P, \tau) \quad (5)$$

Постепенный отказ режущего инструмента может наступить также в результате пластической деформации корпуса резца. Вероятность внезапного отказа инструмента в этой связи является функцией амплитуды A и частоты f вибраций, энергии удара E , нагрузки σ и температуры T , действующих в контакте [2]:

$$\alpha_V = F(A, f, T, \sigma, T, \tau) \quad (6)$$

Затупление режущего инструмента в результате выкрашивания и сколов характерно для твердых сплавов, минерало-керамики и сверхтвердых материалов.

Вероятность отказа инструмента за время τ в результате изнашивания (постепенный отказ) или сколов и разрушений (внезапный отказ):

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_H)(1 - \alpha_V) \quad (7)$$

Для барабана с количеством резцов $z = 72-150$ шт., работающего в течение времени τ , вероятность отказа:

$$\alpha_Z = 1 - (1 - \alpha)^z, \quad (8)$$

где α — вероятность выхода одного резца из строя по любой причине и одинаковая для всех z резцов.

Аналитические и экспериментальные исследования влияния геометрических характеристик на работоспособность и характер износа резцов дорожной фрезы показывают зависимость износа наконечника от износа корпуса резца.

Выводы

1. Изучен характер износа и определена интенсивность изнашивания резцов дорожной фрезы. Построена математическая модель $P = f(S)$, отображающая влияние площади удаленного асфальтобетона на работоспособность резцов, установленных в различных участках барабана.

2. Выбраны критерии определения показателей работоспособности, установлен характер износа рабочих органов дорожных фрез в зависимости от наработки. Приведен анализ работы резцов на участках: переменного; скачкообразного; пологоубывающего. Выделены геометрические характеристики работоспособности, обуславливающие срок службы резца.

3. Разработана математическая модель, отображающая влияние площади удаленного асфальтобетона на работоспособность резцов, установленных в различных участках барабана дорожной фрезы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов С. М. Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні / С. М. Попов, Д. А. Антонюк, В. В. Нетребко. — Запоріжжя : ЗНТУ, ВАТ «Мотор Січ», 2010. — 368 с.
2. Старков В. К. Дислокационные представления о резании металлов. — М. : Машиностроение, 1979. — 158 с.
3. Рейш А. К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин. — М. : Машиностроение, 1986. — 184 с.
4. Крагельский И. В. Трение и износ. — М. : Машиностроение, 1968. — 420 с.
5. Крагельский И. В. Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М. : Машиностроение, 1977. — 526 с.
6. Тенебаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. — М. : Машиностроение, 1966. — 331 с.
7. Львов П. Н. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. — М. : Машгиз, 1962. — 89 с.
8. Сорокин Г. М. Условия ударно-абразивного износа. — Тр. МИНХ и ГП им. И. М. Губкина, вып. 93. М., 1971, С.3—9.
9. Сорокин Г. М. О природе ударно-абразивного изнашивания металлов // Вестник машиностроения. — 1977. — №12. — С.24—28.
10. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. — М. : Машиностроение, 1982. — 320 с.
11. Гордиенко Б. И. Качество инструмента и его работоспособность. — Ростов : Изд-во Ростовского Государственного университета, 1974. — 580 с.
12. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. — М. : Машиностроение, 1981. — 251 с.
13. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М. : Наука, 1976. — 279 с.
14. Попов С. Н. Методология многокритериального подхода при анализе изнашивания сталей и сплавов // Износостойкость сплавов, восстановление и упрочнение деталей машин. — Запорожье. : Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2006. — С.337—415.
15. Громаковский Д. Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. Курс лекций для технических вузов. — М. : Машиностроение, 2005. — 286 с.
16. Parts and More Catalogue 2006. — Wirtgen Group. — 403 p.