

8. Лабораторные и эксплуатационные испытания показали, что вертикальные заземлители с напыленным и оплавленным покрытием порошковыми материалами системы Ni-Cr-B-Si практически не корродируют.

### Заключение

В настоящей работе впервые предпринята попытка с использованием термодинамического подхода объяснить причины интенсивного разрушения вертикальных заземлителей в зоне „земля-воздух“. Вместе с тем, следует отметить, что такой подход обычно характеризует склонность к коррозии за счет флуктуации кислорода в среде, окружающей заземлитель, но не скорость коррозии. В тоже время, как показывает практика, склонность к коррозии может быть значительной, а скорость коррозии может оказаться достаточно низкой. Для определения скорости коррозии необходимо привлечение кинематического подхода, т.е., необходимо рассматривать соотношение между э.д.с. (склонностью к коррозии) и плотностью тока (скоростью коррозии), процессы пассивации поверхности и химические реакции, заживающие пассивирующие пленки, что требует дальнейших исследований. Предложены и апробированы технологические (стационарная и мобильная) нанесения защитных коррозионностойких покрытий на разрушаемые поверхности вертикальных стержней в зоне перехода “земля-воздух”.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Whitman W., Russell R., Ind End Chem, 1924. V/ 16, P265.
2. Revesz A.L., Kruger I., Pas-of Metals, Frankenthal R. P., End., Electrochem. Soc., Princeton, №1., 1979, P. 137...155.
3. Hashimoto K., Osaka K., Masumoto T., Shimodaira S., Corrosion Sci., 16- 71 (1976)

УДК 621.793

Адаменко Д.В. (студент гр. 103415), Сокоров И.О.

## К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ИЗНАШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Термин *фреттинг* используется для обозначения малого колебательного скольжения между поверхностями двух контактирующих тел. Амплитуда такого движения обычно составляет 1 – 100 мкм. Изнашивание, возникающее при таком движении, называют *фреттинг-изнашиванием* [1].

Различают два вида фреттинг-изнашивания в зависимости от механических факторов и факторов, связанных с окружающей средой. Если повреждение при фреттинге вызвано циклическим нагружением, стимулирующим появление поверхностных усталостных трещин, в конечном итоге приводящим к катастрофическому разрушению, то используют термин *фреттинг-усталость*. Вид фреттинга, при котором преобладают химические реакции, получил название *фреттинг-коррозии*. Как правило, оба типа фреттинга протекают одновременно. Циклическое микроперемещение вызывает разрушение защитной (например, оксидной) пленки, покрывающей поверхность металла. Обнажившийся металл легко окисляется, а продукты окисления могут действовать как абразив, приводя к повреждению поверхности.

Относительное скольжение является необходимым условием образования фреттинг-коррозии. При постоянной частоте колебаний изменение амплитуды относительного скольжения приводит к изменению скорости относительного перемещения поверхностей, что может сказываться на условиях трения. Это, в свою очередь, может привести к изменению интенсивности развития фреттинг-коррозии [2].

Некоторые экспериментальные данные показывают, что фреттинг-коррозия начинается

при весьма малых величинах перемещения. Так, Томлинсон отмечает [3, 4], что повреждение поверхности наступает даже тогда, когда относительное перемещение составляет несколько межатомных расстояний. Тем не менее, часть исследований проводилась и при больших амплитудах (до 2 мм).

При анализе интенсивности фреттинг-коррозии важно установить границу значения амплитуд, которая определяла бы специфику условий разрушения поверхности при фреттинг-коррозии по сравнению с износом при обычном трении скольжения.

Авторами [1] исследовалось влияние амплитуд 0,007 – 0,1 мм на интенсивность износа некоторых материалов в условиях вибраций при удельных нагрузках 2 и 10 МПа. Износ для каждой амплитуды соответствует постоянному количеству циклов колебаний (250·10<sup>3</sup> циклов). Для нагрузки 2 МПа амплитудные зависимости износа исследованных материалов приведены на рис. 1.

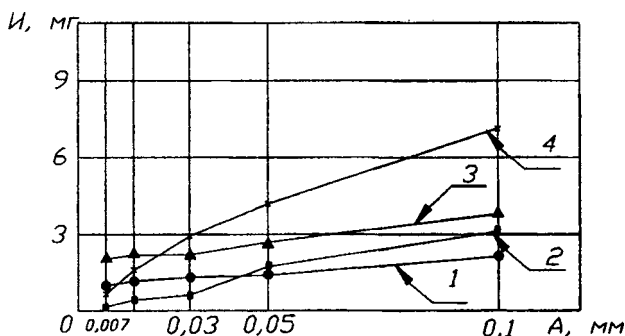


Рис. 1. Зависимость износа (И) от амплитуды относительного скольжения (А) при  $p=2$  МПа;  $f=25$  Гц;  $N=250 \cdot 10^3$  цикл:

1 – сталь 1Х18Н9Т; 2 – сталь 45 закаленная; 3 – бронза БрАЖН9-4-1; 4 – сталь 45 нормализованная

Из анализа полученных данных авторы сделали вывод, что независимо от природы материалов и удельных нагрузок износ при фреттинг-коррозии прямо пропорционален величине амплитуды относительного скольжения в исследуемом диапазоне значений. Скорость изменения износа с ростом амплитуды для разных материалов неодинакова и зависит от удельной нагрузки.

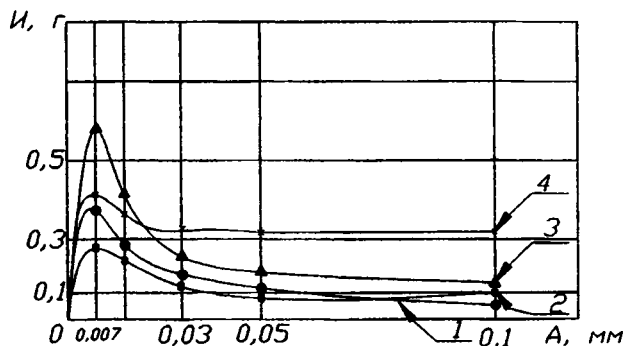


Рис. 2. Зависимость приведенного износа от амплитуды относительного скольжения при  $p=2$  МПа;  $f=25$  Гц;  $N=250 \cdot 10^3$  цикл:

1 – сталь 1Х18Н9Т; 2 – сталь 45 закаленная; 3 – бронза БрАЖН9-4-1; 4 – сталь 45 нормализованная

Для получения более объективной информации авторы [1] привели износ при различных амплитудах скольжения к постоянному пути скольжения. Приведенный износ характеризует интенсивность разрушения поверхности в зависимости от амплитуды скольжения. Результат пересчета износа к  $1 \cdot 10^3$  м пути приведен на рисунке 2.

Исследования поверхностей трения показали, что с увеличением амплитуды скольжения интенсифицируются процессы схватывания, причем с повышением нагрузки активизация указанных процессов начинается при более низких амплитудах [1]. Следовательно, можно за-

ключить, что при пониженных амплитудах скольжения интенсификация износа при фреттинг-коррозии вызывается процессами, отличными по своей природе от схватывания. Такими процессами являются локальное абразивное действие продуктов износа и усталостное разрыхление металла, усугубленное химической активизацией поверхности трения. Очевидно, одним из необходимых условий развития такого специфического поверхностного разрушения является пониженная скорость реверсивного скольжения.

Повышенная склонность к схватыванию (например, бронзы и стали 1X18H9T) может активизировать усталостные процессы в поверхностных слоях, что проявляется в более монотонном характере снижения интенсивности износа при увеличении амплитуды скольжения (рис. 2, кривые 1, 2). В свою очередь, с увеличением удельной нагрузки, когда происходит дополнительная активизация процессов схватывания, и при малых амплитудах скольжения величина амплитуды должна меньше влиять на характер изменения интенсивности фреттинг-коррозии, что и наблюдается для стали 1X18H9T. По той же причине при высоких удельных нагрузках для нормализованной стали 45 увеличивается амплитудный диапазон перехода от одной формы разрушения поверхности к другой. Стабильность поведения закаленной стали 45 и бронзы с изменением нагрузки, может быть связана с большой твердостью и прочностью закаленной стали 45 и с повышенной склонностью бронзы к схватыванию.

Наблюдающееся увеличение коэффициента трения с ростом амплитуды скольжения также свидетельствует о том, что при повышенных амплитудах выход продуктов фреттинг-коррозии из зоны контакта облегчается, что увеличивает вероятность контакта исходных металлических поверхностей и их схватывания. Кроме того, не исключено, что с увеличением амплитуды скольжения микровыступы одной поверхности начинают взаимодействовать с большим количеством неровностей сопряженной с ней поверхности. В результате этого возрастает количество знакопеременных взаимодействий в пятнах фактического контакта, что и проявляется в изменении фрикционных характеристик.

С величиной амплитуды скольжения при фреттинг-коррозии связана скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей, которая может существенно влиять на характер и величину износа. Правда, до настоящего времени нет единого мнения о величине амплитуды, которая ограничивает условия возникновения собственно фреттинг-коррозии без наложения эффектов, свойственных обычному однонаправленному скольжению.

Имеются некоторые данные о том, что при низких частотах (1000.цикл/мин и менее) повреждение, определяемое для данного числа циклов, тем больше, чем ниже частота (рис. 3) [5].

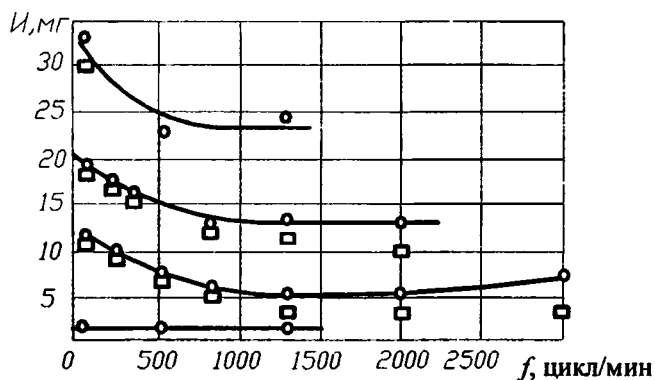


Рис. 3. Влияние частоты колебаний ( $f$ ) на повреждение стали при фреттинге с различными амплитудами проскальзывания при давлении 36,5 МПа:

1 – проскальзывание 10 мкм, число циклов 67800; 2 – проскальзывание 90 мкм, число циклов 67800; 3 – проскальзывание 90 мкм, число циклов 475800, 4 – проскальзывание 230 мкм, число циклов 67800;  
 □ – без поправки на температуру; ○ – с пересчетом на 25°С

Причина этого состоит в наличии коррозионного фактора при фреттинг-коррозии. Поскольку коррозия, которая включает и окисление, является химическим процессом, она зависит от времени. Следовательно, чем ниже частота, тем дольше длится каждый цикл и тем больше время действия химических факторов. Из этого можно заключить, что не следует ожидать

влияния частоты, если фреттинг происходит в пассивной атмосфере. Фен и Улиг показали, что это справедливо для стальных поверхностей, подвергающихся фреттингу в азоте. Кроме того, из их опытов видно, что при частотах выше 1000 цикл/мин влиянием частоты можно пренебречь. Это же подтвердили Рид и Беттер [6], которые исследовали влияние частоты в диапазоне от 3000 до 6000 цикл/мин. На первый взгляд, кажется, что частота оказывает влияние, однако эти результаты приведены для заданного периода фреттинга, а не для заданного числа циклов. Большинство экспериментальных исследований проводилось при частотах выше 1000 цикл/мин, поэтому при сравнении результатов этим фактором можно пренебречь.

Если амплитуда проскальзывания поддерживается постоянной, то объем повреждений при фреттинге плоских стальных поверхностей возрастает линейно с приложением нормальной нагрузки [7].

Авторы работы [8] обнаружили повышение скорости повреждения с увеличением нагрузки в случае фреттинг-износа спеченных алюминиевых порошков. Эти результаты представлены на рис. 4, который включает случаи фреттинга, вибрирующей нормальной нагрузки и комбинации того и другого. Как видно, последнее имеет гораздо большее повреждающее влияние, чем тот или иной из видов отдельно.

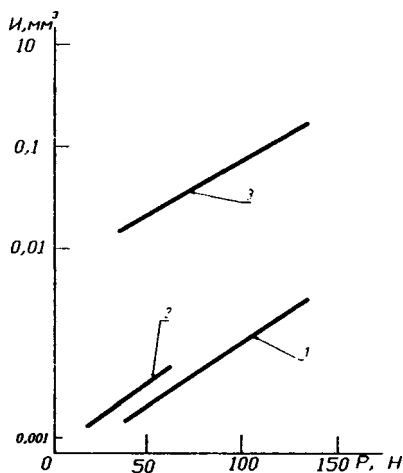


Рис. 4. Зависимость объемных потерь за 24 ч от нормальной нагрузки и вибрации:  
1 – вибрация по нормали, 2 – фреттинг, 3 – комбинированная вибрация

В системах, где увеличение нормальной нагрузки приводит к снижению амплитуды проскальзывания, эти два фактора действуют взаимно противоположно, так что повреждение сначала возрастает, проходит через максимум, а затем снижается [9].

В нашем случае важно рассмотреть влияние на фреттинг-коррозию удельной нагрузки, которая зависит от площади контакта трибопары «опорная поверхность вала – буксовая втулка (или втулка подшипника)». В процессе изнашивания изменяется площадь фактического контакта сопряженных поверхностей и глубина поверхностных слоев металла, принимающих участие в процессах трения и разрушения, следовательно, изменяется и удельная нагрузка.

В работе [10] представлены данные по влиянию удельной нагрузки на износ при фреттинге. Эти данные представлены в виде, позволяющем сравнить их с результатами Фена и Улига [5], Рида и Беттера [6], также приведенными на рисунке. При этом не была произведена корректировка по частоте циклов, которая в последнем случае составляла 6060 цикл/мин, а в опытах Фена и Улига – всего лишь 540 цикл/мин. Низкая частота могла дать более высокие результаты повреждаемости за данное число циклов. Следовательно, соответствие между данными Райта и Фена и Улига хорошее (рис. 5).

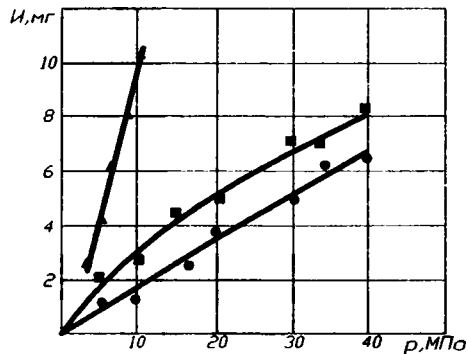


Рис. 5. Зависимость износа стали от удельной нагрузки при фреттинг-коррозии ( $A=90$  мкм,  $N=67\ 800$  циклов):  
 1 – по данным Райта ( $f=38$  Гц); 2 – Фена и Улига ( $f=9$  Гц); 3 – Рида и Беттера ( $f=101$  Гц)

Задачу выделения ведущего процесса при фреттинг-коррозии в случае его затруднительного определения по внешним признакам можно решить методом от обратного [11]. Для этого необходимо исследовать износостойкость поверхностей, обработанных различными технологическими способами, на испытательных машинах, которые воспроизводят основные ведущие процессы. Высокая эффективность защиты обеспечивается лишь при соответствии метода защиты и ведущего процесса. При этом сама эффективность может оцениваться двумя критериями: отношением количества циклов  $N$  к линейному износу образца  $W$ , а также значением коэффициента трения. Пользуясь такой методикой [11], можно дать количественную оценку сопротивления поверхности, упрочненной различными технологическими способами разрушению фреттинг-коррозией.

В соответствии с тремя периодами протекания фреттинг-коррозии можно выделить три ведущих процесса, сопутствующих этим трем периодам. Первопричиной развития первого периода фреттинг-коррозии выступают интенсивно протекающие пластические деформации. Для второго периода ведущим процессом является окисление, а для третьего – разрыхление материала с образованием новых свободных поверхностей.

Повреждение контактирующих поверхностей в условиях фреттинг-коррозии определяется в основном рядом ведущих процессов – коррозионно-усталостными процессами, схватыванием и микрорезанием. Хотя эти процессы развиваются в поверхностном слое одновременно, однако, с учетом свойств контактирующих материалов и условий нагружения один из этих процессов становится ведущим и именно он, в основном, лимитирует ресурс работы контактирующих деталей. Такая дифференциация ведущих процессов позволяет рационально классифицировать методы защиты от того или иного ведущего процесса.

На основе проведенного анализа литературных данных по исследованию фреттинг-коррозии, влияния различных факторов (механического воздействия, химической активности окружающей среды, природы контактирующих материалов) на интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии, а также методов защиты от нее можно сделать вывод о том, что для обеспечения долговечности деталей, работающих в условиях фреттинг-коррозии и высоких удельных нагрузок наиболее рациональным является нанесение на их рабочие поверхности покрытий с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Учитывая специфику таких деталей, как крупногабаритные тяжело нагруженные валы для нанесения покрытий на их рабочие поверхности применимы методы газотермического напыления покрытий.

При выборе оборудования и методики испытаний для проведения исследований фреттинг-коррозии необходимо выдержать ряд требований. С одной стороны имитация фреттинг-коррозии в лабораторных условиях должна максимально приближаться к условиям возникновения этого вида поверхностного разрушения в реальных конструкциях. С другой стороны выбранная методика должна давать возможность сопоставления полученных результатов с данными других работ. В связи со специфичностью условий возникновения фреттинг-коррозии испытательным устройствам предъявляются следующие требования:

- свободное от люфтов крепление образцов в соответствующих зажимных устройствах;

- жесткость к перемещению образцов друг к другу и малая степень деформации устройства;
- наличие виброскользящего движения, регулируемой частоты и амплитуды;
- наличие контролируемой нормальной силы для создания необходимой удельной нагрузки.

По характеру контактирования поверхностей применявшееся для исследований фреттинг-коррозии установки приборы можно разделить на два типа:

- 1) Установки, в которых осуществляется точечный или линейный контакт (шар-плоскость, цилиндр-плоскость).
- 2) Установки для создания вибраций в контакте плоских поверхностей.

Перечисленным требованиям к установкам и характеру контактирования отвечает установка, изготовленная этой установкой в БНТУ.

Кинематическая схема установки представлена на рис. 6.

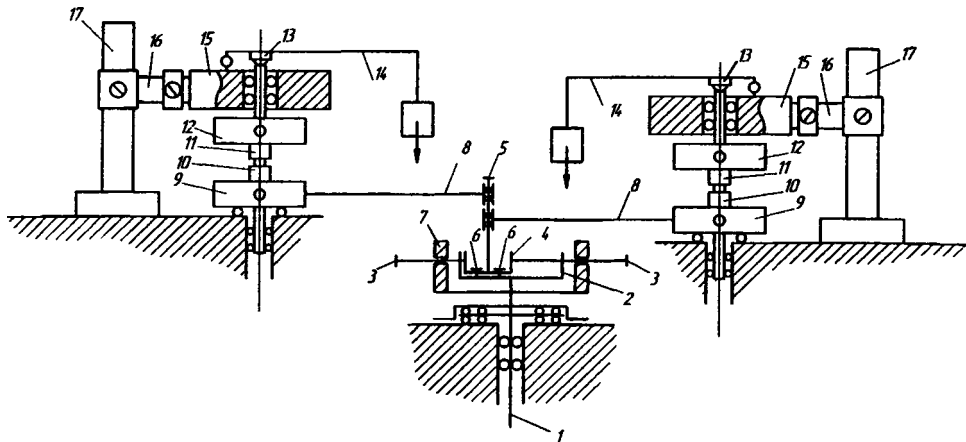


Рис. 6. Кинематическая схема установки для испытаний на фреттинг-коррозию:  
 1 – вал-шпиндель; 2 – каретка; 3 – винт; 4 – подвижная каретка; 5 – ось; 6 – винт; 7 – подвижное кольцо;  
 8 – шатун; 9 – головка; 10 – подвижный образец (контртело); 11 – неподвижный образец;  
 12 – подвижная головка; 13 – сферический подпятник; 14 – рычаг;  
 15 – самоустанавливающийся узел; 16 – консоль; 17 – стойка

От двухскоростного электродвигателя через сменные шкивы и клиноременную передачу вращение передается к валу-шпинделю 1, на котором установлена каретка 2. По внутренней поверхности каретки при помощи винтов 3 может перемещаться подвижная каретка 4 с осью 5. Фиксация каретки 4 осуществляется винтами 6. Для устранения дисбаланса в конструкции механизма установки амплитуды микроскольжения предусмотрено подвижное кольцо 7. Эксцентричное движение оси 5 передается посредством шатунов 8 головками 9, оси вращения которых смещены относительно точки крепления шатунов. В головке с помощью подвижных губок закреплен подвижный образец 10. Узел крепления неподвижного образца 11, 12 аналогичен. Головка 12 имеет возможность вертикально перемещаться в направляющих консоли 17, установленной на стойке 18. Нагружение образцов производится с помощью рычага 14 и грузов через сферические подпятники 13. Узел 16 консоли дает возможность самоустановки образцов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Данная установка позволяет производить испытания при амплитуде относительного микроскольжения от 0 до 2000 мкм, частоте колебаний от 6 до 100 Гц (за счет установки шкивов и двухскоростного двигателя), удельной нагрузке до 400 МПа.

В установке положено в основу торцевое трение контактирующих образцов, выполненных в виде полого кольца (подвижный образец) и цилиндра (неподвижный образец).

Выбранные наружный и внутренний диаметры образцов позволяют свести к минимуму эффект градиента скорости в радиальном направлении. Испытания образцов проводились согласно ГОСТ 23.211 – 80 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний металлов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hutchings, I.M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials / I.M. Hutchings. – Cambridge, 1992. – p.273.
2. Голего, Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля – Киев: «Техніка», 1974 – 272 с.
3. Tomlinson, G.A. – “Proc. R. Soc.”, A, 1927. – Vol. 115. – p.472.
4. Tomlinson, G.A., Thorpe, P.L., Gough, H.J. – “Proc. Instn. Mech. Engers.”, Vol. 141, 1939. – p. 223.
5. Feng, I.-M., Uhlig, H.H. – “J. Appl. Mech.”, 1954. – Vol. 21. – p. 395.
6. Reed, F.E., Batter, J. F. – “Trans. Am. Soc. Lubric. Engers”, Vol. 2, 1960. – p.159.
7. Уотерхауз, Р.Б. Фреттинг-коррозия. Пер. с англ. под ред. канд. техн. наук Г.Н. Филимонова. Л.: «Машиностроение», 1976. – 272с.
8. de Gee A.W.J., Commissaris C.P.I., Zaat J.H. – “Wear”, 1964. – Vol. 7. – p.535.
9. Uhlig, H.H., Tierney, W. D., Mc Clellan, A. – ASTM Spec. Tech. Publ., No. 144, 1953. – p.71.
10. Wright, K.H.R. – “Proc. Instn. Mech. Engers.”, Vol. 1 B, 1952-3. – p.556.
11. Алябьев, А.Я. Методы защиты деталей от фреттинг-коррозии // Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей. – Киев, КНИГА, Вып.1, 1971. – С.58-62.

УДК 621.793

Максимченко Н.Н.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ПЛАКИРОВАНИЯ

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Беларусь*

*Получена математическая модель, позволяющая на стадии разработки технологического процесса определить режимные параметры метода плакирования гибким инструментом, обеспечивающие перенос композиционного материала покрытия на обрабатываемую поверхность, улучшение качественных характеристик сформированного покрытия и повышение эксплуатационных свойств узлов трения.*

**Введение.** Метод плакирования гибким инструментом (ПГИ), основанный на механо-термическом воздействии ворса вращающейся металлической щетки на элемент из материала покрытия и обрабатываемую поверхность, при котором ворсинки щетки переносят частицы материала покрытия на поверхность детали, одновременно осуществляя ее наклеп, успешно применяется для формирования на деталях машин покрытий различного функционального назначения (антифрикционных, износостойких и коррозионностойких, приработочных), а также для восстановления изношенного поверхностного слоя [1-4]. Известно, что покрытия, сформированные методом ПГИ, по своим физико-механическим свойствам значительно отличаются от исходного материала, способствуя улучшению эксплуатационных свойств деталей. В частности, превышение микротвердости нанесенных покрытий над значениями микротвердости массивного материала, используемого для его нанесения, достигает десяти и более раз [2]. Износостойкость в зависимости от вида наносимого материала в условиях циркуляционной смазки при скорости относительного перемещения трущихся поверхностей 0,5 м/с повышается в 10–20 раз, предел выносливости на знакопеременный изгиб увеличивается на 14–20 % [1, 2]. Являясь экономичным, простым в использовании, экологически чистым способом формирования покрытий, метод ПГИ требует тщательного выбора технологических режимов нанесения покрытия, в зависимости от материала покрытия, условий эксплуатации, требуемых свойств покрытия и др. Имеющаяся научно-техническая информация касается в основном технологических режимов формирования однородных покрытий из таких материалов, как медь, латунь, алюминий. Для них разработаны математические модели, устанавливающие взаимосвязи между технологическими параметрами процесса ПГИ (относительное сближение оси щетки и обрабатываемой поверхности (натяг), скорость перемещения щетки по поверхности, усилие прижатия щетки, вре-