

УДК 621.891:669.018.44

*Запорожец В.В.<sup>1</sup>, Ивченко Л.И.<sup>2</sup>, Цыганов В.В.<sup>2</sup>*<sup>1</sup> Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет. Украина, г. Запорожье

## ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СОЖ НА СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СЛОЖНОКОНТАКТИРУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ

*Рассмотрена износостойкость трибосопряжений в условиях многокомпонентного динамического нагружения с наличием в зоне контакта СОЖ с полимерной составляющей. Показаны пути изменения поверхностного слоя деталей при трении воздействием свободных макрорадикалов, образующихся в результате деструкции полимера. Иницирование механохимических явлений в зоне контакта трибосопряжения открывают возможности управления износостойкостью контактирующих деталей.*

Ключевые слова: изнашивание; свободные макрорадикалы; многокомпонентное нагружение; трение; поверхностный слой

### Введение

Эксплуатация полимерных материалов характеризуется явлением деструкции полимерного вещества, которое состоит в разрушении макромолекул при внешнем воздействии (под действием механических напряжений, тепла, кислорода, влаги, света и др.) При этом полимеры начинают терять свои свойства в результате разрушения макромолекул с образованием свободных макрорадикалов. В частности, эксплуатация с высокими механическими напряжениями, сопровождается большими внутренними напряжениями, которые приводят к разрыву химических связей в макромолекуле. Перенапряжения возникают вследствие различий в направлении и величине сил внутреннего трения, которые действуют на отдельные сегменты, на участки цепей, где располагаются элементы надмолекулярной структуры полимера, или вблизи физической и химической сетки и др. [1].

В случае наличия полимера в зоне контакта трибосопряжения процессы, происходящие при механической деструкции, могут оказывать существенное влияние на износостойкость деталей. Согласно литературным данным [2] деструктируемые полимеры активизируют разрушение частиц металла аналогично низкомолекулярным поверхностно активным веществам.

### Постановка задачи

Как показали предварительно проведенные исследования [3], внедрение в зону контакта полиметилметакрилата (ПММА) приводит к существенному увеличению интенсивности изнашивания стали. Применение ПММА связано с тем, что

это единственный из распространенных полимеров, который полностью распадается до мономера. У других полимеров выход мономера варьируется от нуля до значительной доли в общем выходе летучих продуктов.

Причем, чем больше подается раствора, а соответственно, и большее количество ПММА попадает в зону контакта, тем больше степень изменения интенсивности изнашивания. При этом применение СОЖ в виде раствора ацетона с ПММА в рассматриваемых пропорциях сопровождается изменением, как силы трения скольжения, так и покоя. Наблюдаемое снижение почти в два раза сил трения указывает на то, что отмеченное увеличение интенсивности изнашивания стали происходит не в результате адгезионного изнашивания, а вследствие воздействия образующихся при деструкции полимера свободных макрорадикалов. Кроме того на неравномерность физико-химических явлений в зоне контакта в результате нестабильной кинетики механохимических реакций источником которых является деструкция полимера на поверхности стали, свидетельствует увеличенный разброс значений силы трения по длине трассы скольжения [3].

Необходимо учитывать, что многие трибосопряжения работают в условиях многокомпонентного динамического нагружения связанного с вибрациями, действующими в разных направлениях. Кроме того, с увеличением длительности работы трибозула происходит постепенное изменение условий изнашивания. Меняется динамический режим нагружения (как правило, в сторону повышения динамической составляющей нагрузки за счет увеличения зазоров), характер взаимодействия деталей в узле (износ при фреттинге может переходить в режим износа при ударе с последующим про-

скальзыванием), контактирование в упругой области сменяется контактированием в упруго-пластической или пластической областях. Трение в условиях многокомпонентного динамического нагружения сопровождается формированием определенного структурного состояния поверхностного слоя контактирующих деталей с прочностными и деформационными свойствами, определяющими его износостойкость. Сложный характер нагружения приводит к напряженному состоянию поверхностных слоев материалов трибосопряжения, что сопровождается повышенным износом. В частности, повышенный износ происходит у деталей с однородным равнопрочным поверхностным слоем [4].

Согласно литературным данным [5, 6] подобное многокомпонентное нагружение инициирует механохимические явления в зоне контакта трибосопряжения. Механохимические превращения отличаются от других химических реакций, инициированных физическими методами тем, что они могут развиваться при сравнительно невысоком среднем уровне энергии в единице объема вещества. В переменных механических полях эффективность механохимического процесса резко увеличиваться с ростом интенсивности воздействия и имеет наибольшую величину в условиях максимальной концентрации механической энергии на единицу объема вещества в единицу времени.

На основании результатов предварительных исследований установлен сложный характер зависимости эксплуатационных свойств нержавеющей стали от совместного действия свободных макрорадикалов полимера, структурного состояния поверхностного слоя металла, химико-физических свойств окружающей среды и условий механического нагружения в трибоконтакте [7].

### Результаты исследования

Для проведения комплексных исследований по уточнению степени влияния свободных макрорадикалов на износостойкость и состояние поверхностного слоя материалов деталей в условиях приближенных к реальным условиям эксплуатации трибосопряжений были разработаны специальные устройства и методики ускоренных испытаний, которые позволяют реализовать условия различных видов многокомпонентного нагружения при трении [8]. На одной из установок было смоделировано трение в условиях трехкомпонентного нагружения – (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях) для образцов стали 40X. Испытания проводились в режиме граничного и полужидкостного трения с подачей в зону контакта исследуемых образцов ацетона и раствора ПММА в ацетоне (1 г порошка ПММА на 200 мл ацетона) по методике, представленной в

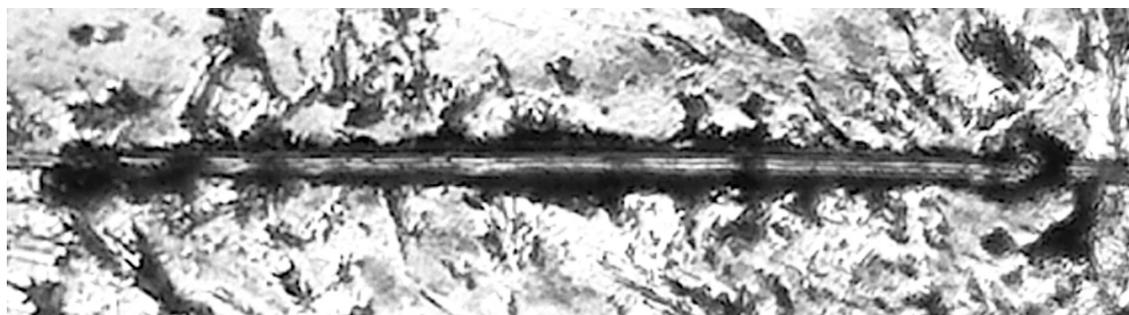
работе [3]. При этом предварительное растирание полимера до порошкового состояния способствовало дополнительному инициированию механодеформации и повышенному содержанию свободных макрорадикалов в растворе.

Сравнительную оценку изменения физико-механических свойств поверхностного слоя образцов осуществляли методами непрерывного вдавливания и сканирования индентором на специальном приборе "Микрон-гамма" разработанном в Национальном авиационном университете. Метод непрерывного вдавливания индентора основан на автоматической регистрации глубины внедрения в зависимости от приложенной нагрузки на индентор. Метод сканирования базируется на непрерывной регистрации сопротивления движению индентора по поверхности (тангенциальная составляющая силы трения индентора) в зависимости от приложенной нагрузки. Определение статистических связей между сопротивлениями локальных микрообъемов материала контактного деформированию позволяет произвести комплексную оценку состояния поверхностного слоя на трассе сканирования и, в частности, позволяет оценивать среднюю прочность на трассе сканирования, оценивать разброс и неоднородность прочностных свойств, моделировать элементарные акты процессов трения и износа [9, 10].

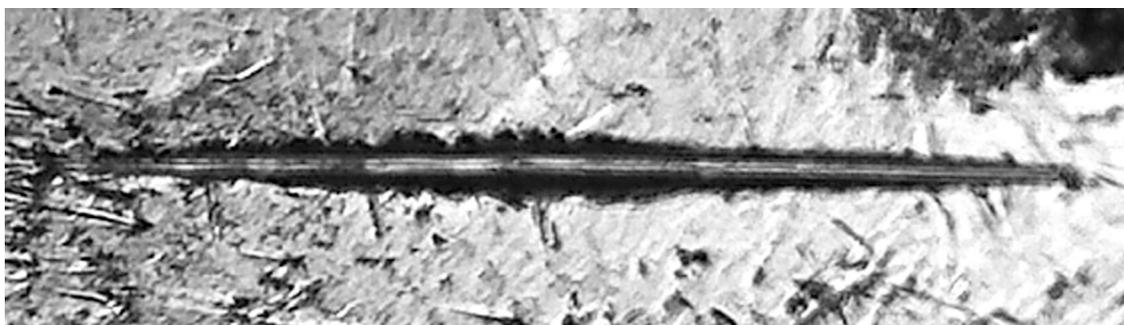
Оценка состояния поверхностного слоя образцов на приборе "Микрон-гамма" осуществлялась в работе с использованием программы для управления, сбора и обработки информации методом сканирования. Режимы сканирования: величина нагрузки на индентор – 50 сН; скорость нагружения – 5 сН/с; скорость сканирования – 40 мкм/с. Длина трассы 455 мкм, индентор R = 10 мкм.

Как следует из внешнего вида поверхностей образцов после трения и рисков сканирования (рис. 1), внедрение в зону контакта деталей полимерной составляющей СОЖ приводит к снижению равновесной шероховатости и повышению однородности контактирующей поверхности. Полученная поверхность содержит меньше задиров и раковин, а ширина риски характеризуется большей равномерностью с более четким формированием зон постепенного вхождения и выхода индентора при сканировании.

Более наглядно оценить однородность поверхностного слоя возможно по трибограммам сканирования поверхностей, используя элементы трибо-спектрального анализа [10, 11]. Согласно трибо-спектральному методу в процессе перемещения образца индентор осуществляет вынужденные колебания, характер которых обусловлен различным физическим сопротивлением структуры поверхностного слоя материала. В результате равномерного перемещения процесс изменения тангенциальной и нормальной реакции нагружающей силы представляет



а



б

Рис. 1. Риска при сканировании образца, работавшего в режиме граничного трения с подачей в зону контакта ацетона (а) и раствора ацетона с ПММА (б)

собой совокупность колебаний зависящими от размеров фрагментов, блоков и других структурных составляющих материала, обладающих разным сопротивлением контактному деформированию.

Как следует из рисунка 2, изменение деформационно-прочностных свойств поверхностного слоя образцов для рассматриваемых случаев существенно отличается. Особенно вдоль участков ограниченного нормальным нагружением  $[N_1 - N_2]$  и  $[N_3 - N_4]$ . Фрагменты поверхностного слоя образца а) более мелкие, чем образца б). В первом случае (рис. 2а) наблюдается наличие структурных элементов различных размеров, что выражается в наличии нескольких характерных амплитуд процесса. Во втором случае (рис. 2б) характер изменения тангенциальной составляющей силы трения  $P(t)$  указывает на однородную крупно-фрагментную структуру.

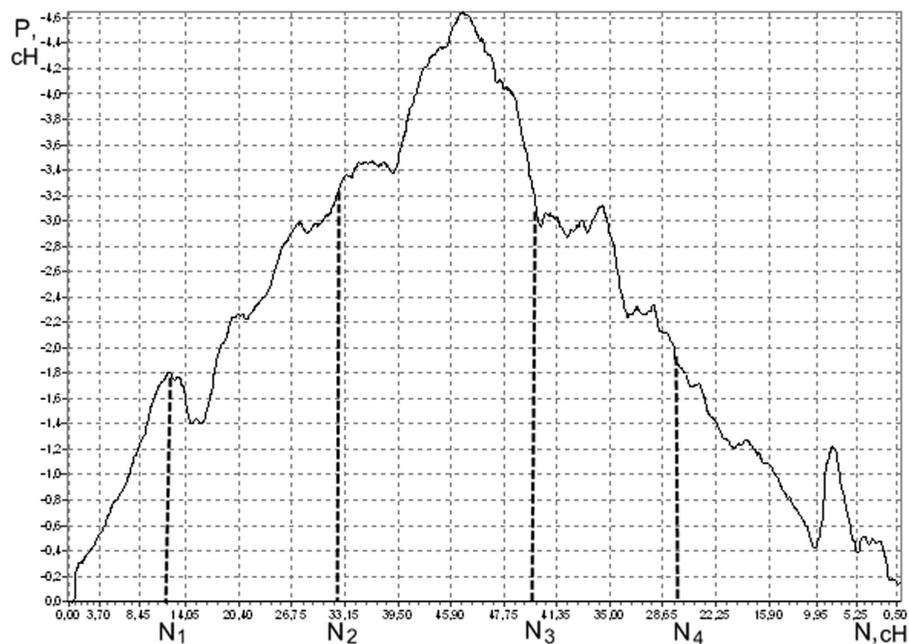
Дисперсия силы трения снижается и составляет соответственно 0,029 и 0,022. При этом снижается износостойкость. Структурно чувствительный динамический коэффициент отражающий кинетику процесса также снижается и находится в пределах соответственно  $0,4 \cdot 10^{-3} \dots 4,7685$  и  $0,2 \cdot 10^{-3} \dots 1,8419$  согласно уравнениям 6-й степени зависимости силы трения от времени:

$$P = 0,0004t^6 - 0,013t^5 + 0,1748t^4 - 1,0781t^3 + 3,1534t^2 - 4,7685t + 1,6611 \quad (1)$$

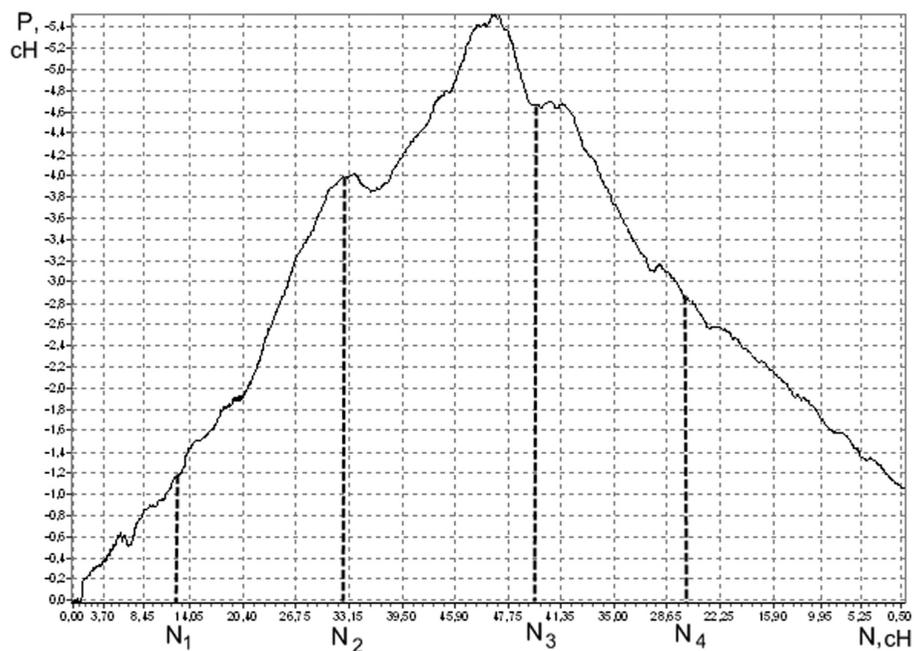
$$P = 0,0002t^6 - 0,0058t^5 + 0,0792t^4 - 0,4629t^3 + 1,1367t^2 - 1,8419t + 0,5139 \quad (2)$$

Кроме того, основываясь на том, что изменение силы сопротивления деформированию  $P(t)$  обуславливает изменение глубины внедрения индентора  $H(t)$  мгновенное изменение глубины внедрения индентора  $H(L)$  может выступать мерой нанотвердости (твердости фрагментов). Полученные при исследованиях данные изменения глубины внедрения индентора по трассе сканирования наглядно показывают влияние наличия полимерной составляющей в СОЖ на твердость поверхностного слоя образцов при трении. В частности, представленные на рисунке 3 изменения глубины внедрения индентора по длине трассы сканирования образцов после граничного трения с подачей в зону контакта ацетона и раствора ацетона с ПММА, позволяют отметить уменьшение твердости поверхностного слоя вследствие воздействия полимера до 20%.

Отмеченные явления характерны и при более интенсивной подаче СОЖ в зону контакта трибосопряжения. Изменение глубины внедрения индентора по длине трассы сканирования образца после полужидкостного трения с подачей в зону контакта ацетона и раствора ацетона с ПММА, представленные на рисунке 4, указывает на уменьшение твердости поверхностного слоя при наличии полимера. При этом увеличение глубины внедрения индентора составило до 53%. Можно предположить, что наблюдаемые изменения являются результатом воздействия большего количества свободных макрорадикалов.



а



б

Рис. 2. Трибограммы сканирования поверхностей образца после граничного трения с подачей в зону контакта ацетона (а) и раствора ацетона с ПММА (б)

При этом, как показывают результаты статистической обработки изменения глубины внедрения, дисперсия сигнала составляет соответственно 0,014 и 0,024. Структурно чувствительный динамический коэффициент снижается и находится в пределах соответственно  $0,3 \times 10^{-3} \dots 7,5601$  и  $0,2 \times 10^{-3} \dots 3,4744$  согласно уравнениям 6-й степени зависимости глубины внедрения от времени:

$$H = -0,0003t^6 + 0,0099t^5 - 0,148t^4 + 1,0739t^3 - 3,9955t^2 + 7,5601t - 3,2119 \quad (3)$$

$$H = -0,0002t^6 + 0,0075t^5 - 0,084t^4 + 0,435t^3 - 1,2904t^2 + 3,4744t - 1,1794 \quad (4)$$

Модель разрушения поверхности представляется в следующем виде: а) механическая деструкция полимерных цепей, образование макрорадикалов; б) адсорбция макрорадикалов на ювенильной по-

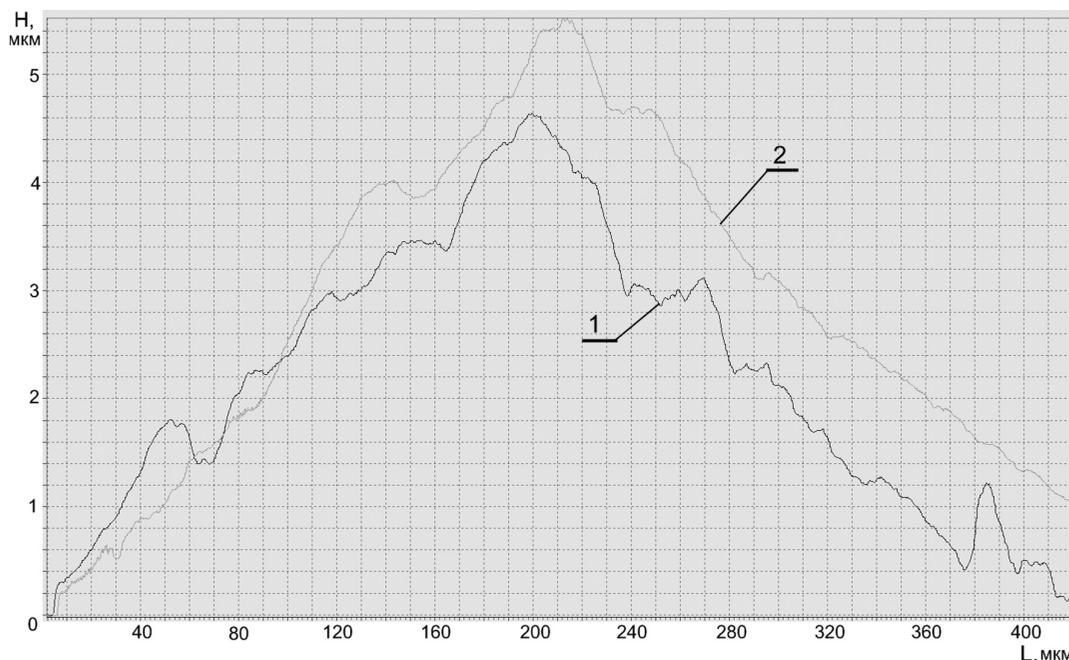


Рис. 3. Изменение глубины внедрения индентора по длине трассы сканирования образца после граничного трения с подачи в зону контакта ацетона (1) и раствора ацетона с ПММА (2)

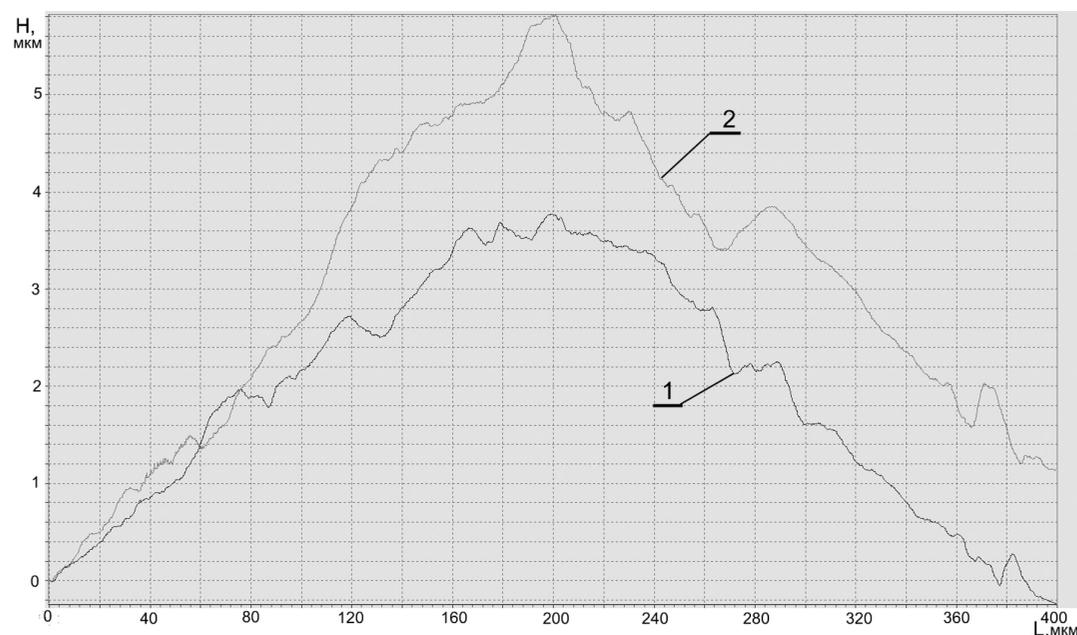


Рис. 4. Изменение глубины внедрения индентора по длине трассы сканирования образца после полужидкостного трения с подачи в зону контакта ацетона (1) и раствора ацетона с ПММА (2)

верхности металла; в) пластифицирование, охрупчивание и разрушение металла. При адсорбции макрорадикалов на ювенильных поверхностях деформированного активного металла поверхностная энергия металла уменьшается. В связи с этим в поверхностных слоях металла создаются благоприятные условия для пластифицирования – движения, зарождения и взаимодействия дислокаций. Резкое увеличение плотности несовершенств охрупчивает металл [2].

Таким образом, представленные результаты исследований показывают на существенное изменение состояния поверхностного слоя контактирующих деталей трибосопряжений под воздействием свободных макрорадикалов, образующихся при деструкции полимера. В рассмотренных условиях трения сформировался поверхностный слой, который характеризуется как однородный крупнофрагментный пониженной твердости, что может служить причиной отмеченного ранее увеличения

износа. Существенное снижение износостойкости является положительным фактором для облегчения приработки поверхностей и снижения сил резания при технологической обработке.

Однако наличие свободных радикалов в зоне контакта трибосопряжения может способствовать повышению его износостойкости. Для этого необходимо создать условия по формированию износостойкого неоднородного структурного состояния поверхностного слоя контактирующей детали с наличием крупных и мелких фрагментов различной прочности. Как было показано в работе [4], обеспечение неоднородности структурного состояния возможно за счет исключения или уменьшения ударного нагружения в трибосопряжении, уменьшения амплитуды поперечных и продольных проскальзываний. Изменение параметров нагружения достигается уменьшением зазоров в трибосопряжении или путем демпфирования колебаний. Выбор конкретных конструктивно-технологических мероприятий должен производиться с учетом реальных условий эксплуатации трибосопряжения и физики процесса разрушения на основании свойств поверхностного слоя.

Получение подобного структурного состояния отмечено в процессе абразивной обработки без подачи СОЖ специальным гранулированным шлифовальным материалом, изготовленным на основе ПММА и абразивного зерна [7]. При этом обеспечивается контакт режущего инструмента и обрабатываемого материала с наличием полимера в условиях сложного динамического нагружения. Обработка всухую изменила кинетику механохимических реакций макрорадикалов, процесс формирования и разрушения контактирующих поверхностей, но механизм этих изменений требует дополнительного изучения.

### Выводы

Таким образом, варьирование условиями протекания механохимических реакций в зоне контакта трибосопряжения при наличии свободных макрорадикалов открывает большие перспективы управления износостойкостью контактирующих деталей. Оптимизация этих условий с учетом динамики нагружения и образующегося структурного состояния поверхностного слоя позволяет расширить технологические возможности обеспечения долговечности трибосопряжений как в процессе изготовления деталей машин и механизмов, так и при их эксплуатации.

### Литература

- [1] Максанова, Л.А. Полимерные соединения и их применение: Учеб. пособ. / Л.А. Максанова, О.Ж. Аюрова. – Улан-Уде: ВСГУТУ, 2005. – 356с.
- [2] Гороховский, Г.А. Полимеры в технологии обработки металлов /Г.А. Гороховский. – К.: Наукова думка, 1975. – 224 с.
- [3] Ивченко, Л.И. Особенности трибологических явлений в контакте сопряжений при наличии полимера и многокомпонентном динамическом нагружении /Л.И. Ивченко, В.В.Цыганов //Технологические системы. – 2013.– №4. – С. 16-21.
- [4] Ивченко, Л.И. Особенности изнашивания трибосопряжений в условиях трехмерного нагружения /Л.И. Ивченко, В.В.Цыганов, И.М.Закиев //Трение и износ. – 2011. – Том 32. – № 1. – С. 500–509.
- [5] Александров, И. А. Процессы образования металлоорганических комплексов при импульсном механическом воздействии: дисс ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17. – Москва, 2001. – 118 с.
- [6] Бутягин, П.Ю. Кинетика и природа механохимических реакций //Успехи химии.– 1971. – Т. XL, Вып. 11.– С. 1935–1959.
- [7] Цыганов, В.В. Влияние макрорадикалов на эффективность шлифования лентами из гранулированного абразивного материала //Вісник двигунобудування. – 2012. – №1 – С. 186–191.
- [8] Ивченко, Л.И. Моделирование износостойкости трибосопряжений при сложном динамическом нагружении /Л. И. Ивченко, В. В. Цыганов //Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – №7 – С. 31–36.
- [9] Игнатович, С.Р. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклических нагружениях методами наноиндентирования и наносклерометрии /С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, Д.И. Борисов //Проблемы прочности. – 2006. – № 4. – С. 132–139.
- [10] Никитин, Ю.А. Теоретические и экспериментальные основы микромеханических испытаний материалов сверхнизкой плотности (часть 2) /Ю.А. Никитин, В.В. Запорожец //Технологические системы. – 2010. – №4. – С. 63–69.
- [11] Запорожец, В.В. Деформационно-спектральный метод исследования однородности поверхностного слоя металлов /В.В. Запорожец, Х.Б. Кордонский, О.В. Оре //Надежность и долговечность машин и сооружений. – 1990. – №17. – С. 57–65.

Zaporozhith V.V.<sup>1</sup>, Ivschenko L.I.<sup>2</sup>, Tsyganov V.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Aviation University. Ukraine, Kiev

<sup>2</sup>Zaporozhye National Technical University. Ukraine, Zaporozhia

## INFLUENCE OF POLYMERIC CONSTITUENT LUBRICATING COOLING LIQUID ON THE STATE OF SUPERFICIAL LAYER WITH A DIFFICULT CONTACT OF DETAILS

*The wearproofness of tribojoints is considered in the conditions of complex dynamic ladening with a presence in the zone of contact lubricating cooling liquid with a polymeric constituent. The ways of change of superficial layer of details are shown at a friction by influence of free macroradicals appearing as a result of destruction of polymer. Initiation of the mechanical and chemical phenomena in the zone of contact of tribojoints is opened by management possibilities by wearproofness of contacting details.*

*Keywords:* wear; free macroradicals; complex ladening; friction; superficial layer

### References

- [1] Maksanova L.A. Polymeric compound and their application: Studies. man. /L.A. Maksanova, O.Zh. Ayurova. – Ulan-Ude: VSGTU, 2005. – 356 p.
- [2] Gorokhovskiy G.A. Polymers in technology of treatment of metals. – K.: Naukova dumka, 1975. – 224 p.
- [3] Ivschenko L.I. Features of the tribology phenomena are in the contact of interfaces at presence of polymer and multi-component dynamic ladening /L.I. Ivschenko, V.V.Tsyganov // Technological systems. – 2013.– №4. – P. 16–21.
- [4] Ivschenko L.I. Features of wear of трибосопряжений in the conditions of three-dimensional ladening / L.I. Ivschenko, V.V.Tsyganov, I.M.Zakiev //Friction and wear. – 2011. Tom 32. – № 1. – P. 500–509.
- [5] Aleksandrov I. A. Processy formations of metallical organic complexes at impulsive mechanical influence: dissertation of cand. physics-mathem. sciences : 01.04.17. – Moscow, 2001. – 118 p
- [6] Butyagin P.Yu. Kinetics and nature of mechanical and chemical reactions // Successes of chemistry.– 1971. – V.XL, Vip. 11. – P. 1935–1959.
- [7] Tsyganov V.V. Influence of macroradicals on efficiency of polishing ribbons from granular abrasive material // Announcer of construction of engines. – 2012. – №1 – P. 186–191.
- [8] Ivschenko L.I. Imagineering of wearproofness of tribojoints at the complex dynamic ladening /L. I. Ivschenko, V. V. Tsyganov // Friction and greasing in machines and mechanisms. – 2011. – №7 – P. 31–36.
- [9] Ignatovich, S. Estimation of damaged of superficial layer of materials at cyclic the ladenings of methods of nanoindentation and nanoscleromeasure /S. Ignatovich, I.M. Zakiev, D.I. Borisov // Problem of durability.– 2006. – N4. – P. 132–139.
- [10] Nikitin J.A. Theoretical and experimental bases of micromechanical tests of materials of ultralow closeness (part 2) / J.A. Nikitin, V.V. Zaporozhith //the Technological systems. – 2010. – №4. – P. 63–69.
- [11] Zaporozhith V.V. Deformation–spectral method of research of homogeneity of superficial layer of metals / V.V. Zaporozhith B.B., X.B. Kordonskiy, O.V. Ore //Reliability and longevity of machines and buildings. –1990. – №17. – P. 57–65.