

Дискретно-континуальное упрочнение контактирующих элементов конструкций: концепция, математическое и численное моделирование

Докт. техн. наук, проф. Н. А. Ткачук¹⁾, докт. техн. наук С. А. Кравченко¹⁾,
доктора техн. наук, профессора В. А. Пылев¹⁾, И. В. Парсаданов¹⁾,
канд. техн. наук А. В. Грабовский¹⁾, инж. О. В. Веретельник¹⁾

¹⁾Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Предложен вариант дискретно-континуального упрочнения контактирующих элементов машиностроительных конструкций. Одна из деталей упрочняется дискретно, а ответная – континуально. Получаемая пара сочетает положительные качества двух разнотипных методов упрочнения. Исследование напряженно-деформированного состояния обработанных фрагментов дает основание для вывода о высокой эффективности предложенного комбинированного метода упрочнения. При его использовании, в отличие от традиционных вариантов технологий упрочнения, задействуются механизмы отрицательной обратной связи между этапами «нагружение – контактное взаимодействие – трение – износ». В результате получается положительный интегральный эффект от применения разработанной технологии упрочнения. Данный эффект существенно превышает сумму эффектов от использования каждой из технологий упрочнения. При этом обеспечивается благоприятное распределение контактных давлений между контактирующими телами. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению износа, что препятствует резкому возрастанию действующих между телами нагрузок. Таким образом происходит стабилизация исследуемых процессов. Для демонстрации положительных эффектов, возникающих при контакте упрочненных тел, рассмотрено напряженно-деформированное состояние представительного фрагмента исследуемой системы. Результаты расчетов свидетельствуют о справедливости прогнозных предположений. Действительно, упрочненные зоны воспринимают большие нагрузки. Однако в силу высоких трибомеханических свойств материала в упрочненных зонах трение и износ в них намного ниже, чем у основного материала. За счет этого формируются все положительные компоненты суммарного эффекта. Данный эффект подкрепляется тем, что ответная деталь обработана континуально. В частности, металлы из материалов типа алюминия покрываются тонким слоем оксидов путем их образования в сильном электрическом поле в специальной среде. Образующие твердые фазы оксидов служат структурной основой формирования поверхностных слоев. В сочетании с дискретно упрочненными поверхностями ответных деталей образуемая пара приобретает высокие прочностные, антифрикционные и противоизносные свойства.

Ключевые слова: контакт, трение, износ, напряженно-деформированное состояние, зона дискретного упрочнения, корундирование, метод конечных элементов, рациональные технологические параметры, представительный объем, обратная связь, энергоэффективность, машиностроительная конструкция

Для цитирования: Дискретно-континуальное упрочнение контактирующих элементов конструкций: концепция, математическое и численное моделирование / Н. А. Ткачук [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 3. С. 240–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-240-247>

Discrete and Continual Strengthening of Contacting Structural Elements: Conception, Mathematical and Numerical Modeling

N. A. Tkachuk¹⁾, S. A. Kravchenko¹⁾, V. A. Pylev¹⁾, I. V. Parsadanov¹⁾, A. V. Grabovsky¹⁾, O. V. Veretelnik¹⁾

¹⁾National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” (Kharkiv, Ukraine)

Abstract. The paper proposes a variant of discrete and continual strengthening of contacting elements of machine-building structures. One of the parts is strengthened discretely, and its counterpart is strengthened continually. The resulting pair

Адрес для переписки

Ткачук Николай Анатольевич
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Кирпичева, 2,
61002, г. Харьков, Украина
Тел.: +38 057 707-69-02
tma@tmm-sapr.org

Address for correspondence

Tkachuk Nikolay A.
National Technical University
“Kharkiv Polytechnic Institute”
2 Kyrpychova str.,
61002, Kharkov, Ukraine
Tel.: +38 057 707-69-02
tma@tmm-sapr.org

combines positive qualities of two different types of strengthening methods. Investigations on stressed-deformed state of the treated fragments provides a basis for conclusion about high efficiency of the proposed combined strengthening method. While applying the method mechanisms of negative feedback between the stages “loading – contact interaction – friction – wear” are involved unlike with conventional versions of strengthening technologies. In this way, positive integral effect results from an application of the developed strengthening technology. This effect is significantly higher than the sum of effects obtained owing to application of every strengthening technology. In this case a favorable distribution of contact pressures between contacting bodies has been ensured. This, in its turn, leads to a decrease in wear that prevents a sharp increase in loads acting between bodies. Thus stabilization of the investigated processes occur. The papers considers stress-strain state of a representative fragment of the investigated system in order to demonstrate positive effects arising from the contact of strengthened bodies. Results of the calculations indicate validity of forecast assumptions. Indeed, the strengthened zones can bear high loads. However, due to high tribo-mechanical properties of the material in the hardened zones, friction and wear in them are much lower than for a base material. Due to this, all positive components of the total effect are formed. This effect is supported by the fact that a counterpart is processed continually. In particular, metals from aluminum-type materials are coated with a thin layer of oxides by forming them in a strong electric field of a special medium. Formed solid phases of oxides serve as a structural basis for formation of surface layers. In combination with discretely strengthened surfaces of counterparts the formed pair acquires high strength, antifriction and anti-wear properties.

Keywords: contact, friction, wear, stressed-deformed state, zone of discrete strengthening, corunding, finite element method, rational technological parameters, representative volume, feedback, energy efficiency, mechanical engineering construction

For citation: Tkachuk N. A., Kravchenko S. A., Pylev V. A., Parsadanov I. V., Grabovsky A. V., Veretelnik O. V. (2019) Discrete and Continual Strengthening of Contacting Structural Elements: Conception, Mathematical and Numerical Modeling. *Science and Technique*. 18 (3), 240–247. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-240-247> (in Russian)

Введение

Современные машиностроительные конструкции работают в условиях интенсивных нагрузок. Соответственно при проектировании их элементов возникают все более сложные задачи обеспечения прочности, долговечности, надежности, экономичности. В частности, для элементов, работающих в контактирующих парах, это трансформируется к требованиям достижения повышенных характеристик контактной прочности, снижения трения и износа.

Только за счет конструктивных решений достижение высоких эксплуатационных характеристик затруднительно. Соответственно приходится применять технологические методы упрочнения [1–5]. Среди них привлекают внимание способы дискретного и континуального упрочнения [6, 7].

В то же время традиционные и предложенные в последнее время методы упрочнения не исчерпывают всех потенциальных возможностей повышения трибомеханических характеристик деталей, работающих в паре при высоких нагрузках. Это вынуждает разрабатывать новые методы упрочнения, а также проводить сопутствующие исследования прочности, трения и износа. Данному направлению посвящена предлагаемая статья.

Анализ литературных источников

В современной литературе [1–6] описано применение различных методов упрочнения,

как то: цементация, азотирование, ионная имплантация, применение ТВЧ, электроискровое легирование и др. Всем им присущи как положительные качества, так и недостатки. В то же время можно выделить ряд принципиальных недостатков, которые трудно устранить при традиционных методах [6]. В частности, во многих случаях выполненное упрочнение не допускает в дальнейшем (после определенной стадии износа сопряженных деталей) применения каких-либо повторных способов упрочнения. Кроме того, при нанесении или создании сплошного поверхностного слоя со свойствами, отличными от характеристик основного материала обработанной детали, возникают проблемы отслаивания, растрескивания при силовом, термохимическом или тепловом воздействии. Также отрицательным является чувствительность материала упрочняемых деталей к созданию полей остаточных напряжений при применении многих технологий, что вызывает их коробление, снижение выносливости и т. п.

Многих проблемных ситуаций при упрочнении удастся избежать, например, применением дискретного упрочнения либо корундирования [6, 7]. Первый из этих методов – энергоэффективный, с низким тепловым воздействием на обрабатываемую деталь, создает не сплошное покрытие, а наличие на рассматриваемой поверхности зон дискретного упрочнения. Этим самым удастся избежать негативных по-

следствий упрочнения. Второй из методов предполагает «выращивание» на поверхности детали (например, из алюминиевого сплава) слоя, состоящего из твердых фаз оксидов основного материала. Вследствие такой операции создается надежная связь между порождающим и порождаемым материалами. Таким образом, предложенные и описанные в [6, 7] технологии, каждая сама по себе, обладают рядом положительных качеств. Для усиления этих качеств возможным является путь соединения преимуществ указанных технологий [8]. В свою очередь, это требует исследования напряженно-деформированного состояния и контактного взаимодействия. В частности, в [9–11] предложены методы численного моделирования напряженно-деформированного состояния контактирующих тел с учетом различных их свойств. В то же время отсутствуют разработки, соединяющие разнотипные, но связанные процессы и состояния: напряженно-деформированное состояние, трение и износ. Поэтому возникает актуальная задача разработки такого объединяющего подхода.

Постановка задач исследований

Цель работы – создание концептуальных основ комбинированных технологий дискретно-континуального упрочнения высоконагруженных деталей машиностроительных конструкций, исследование их контактного взаимодействия, трения, износа и обоснование рациональных технологических режимов упрочнения. При этом предлагается решение следующих задач:

- 1) разработка концептуальных основ технологических методов комбинированного упрочнения деталей в подвижном сопряжении;
- 2) исследование контактного взаимодействия представительного фрагмента контактирующей пары при дискретно-континуальном упрочнении;
- 3) анализ и обобщение полученных результатов.

Разработка концептуальных основ технологических методов комбинированного упрочнения деталей в подвижном сопряжении

Принципиально новые качества упрочнения поверхностных слоев и повышение комплекса трибомеханических характеристик трущихся

деталей – достаточно сложная комплексная задача. Дело в том, что отдельные ее аспекты сегодня решены в ряде технологических приемов [1–5]. В то же время, как правило, улучшение какой-либо одной характеристики сопровождается ухудшением другой. Такая ситуация наблюдается, например, с парами характеристик «твердость – выносливость», «прочность – пластичность», «адгезионная прочность – изнашиваемость» и т. п. Речь во многих случаях идет не об оптимизационных решениях, а о некоторых компромиссных вариантах.

В противовес отмеченному выше предложенные в [6, 7] методы дискретного и континуального упрочнения уже сами по себе, взятые отдельно, обладают принципиально преобладающими свойствами. Их совокупность дает возможность, в противовес традиционным технологиям, улучшить не одну из трибомеханических характеристик за счет ухудшения других, а целый их набор, причем, не ухудшая остальные. Соответственно стоит ожидать при совместном применении этих методов упрочнения (каждого – на сопряженной друг другу детали) проявления новых качеств и улучшения количественных показателей отдельных характеристик.

Для обоснования улучшения прогнозируемых свойств следует обратиться к исходным концептуальным положениям при анализе процессов и состояний в исследуемой паре. Действительно, рассматривая с системной точки зрения не только сам объект как пару взаимодействующих деталей, но и реализуемые связанные процессы и состояния, такие как «нагрузка – контактное давление – трение – износ» (НКТИ), можно отметить следующее.

1. При применении традиционных технологий упрочнения при приложении нагрузки между телами возникают значительные нормальные и тангенциальные усилия. Вследствие взаимного смещения деталей появляются потери на трение, а также износ сопрягаемых поверхностей. В результате износа возрастают зазоры в сопряжениях и соответственно эксплуатационные нагрузки. Таким образом, в цепи НКТИ реализуется положительная обратная связь процессов и состояний. Указанное можно изобразить в плоскости сегментов НКТИ в виде раскручивающейся и прогрессирующей спирали P (рис. 1а).



Рис. 1. Реализация связи а – в системе «нагрузка – контактное давление – трение – износ» (НКТИ) при традиционных видах упрочняющей обработки деталей; б – в системе НКТИ при дискретно-континуальном упрочнении: *N* – номинальный цикл процесса; *P* – прогрессирующее самоускоряющееся развитие исследуемых процессов и состояний; *S* – стабилизирующееся самозамедляющееся развитие исследуемых процессов и состояний

Fig. 1. Realization of link: a – in “loading – contact pressure – friction – wear” system with conventional types of strengthening processing of parts; b – in “loading – contact pressure – friction – wear” system with discrete and continual strengthening: *N* – nominal process cycle; *P* – progressive self-accelerating development of investigated processes and states; *S* – stabilizing self-retarding development of investigated processes and states

Нужно подчеркнуть, что эта положительная связь таковой проявляет себя на каждом из сегментов цепи НКТИ. Данное обстоятельство не дает возможности компенсации реализуемой раскрутки. Спираль *P* при этом ускоряюще удаляется от номинального начального режима *N*.

2. Дискретное упрочнение приводит к реализации двух эффектов – Δ и σ [6]. Они состоят в том, что из-за сложной деформируемости и изнашиваемости при нагружении дискретно-упрочненной поверхности зоны ее дискретного упрочнения выступают над номинальной поверхностью основного материала детали. Вследствие этого основной силовой поток замыкается по зонам дискретного упрочнения. По ним же и происходит трение с меньшим коэффициентом, и соответственно имеет место менее интенсивный износ.

3. В силу отмеченных в п. 2 особенностей силового взаимодействия в сопряжении дискретно упрочненных тел в системе реализуется не прогрессирующая, а стабилизирующаяся кривая *S* (рис. 1б). На каждом последующем цикле скорость удаления от номинального начального режима *N* замедляется.

Таким образом, исходя из общеконцептуальных соображений, следует особое внимание уделять реализации отрицательной обратной связи, желательно – на каждом из сегментов цепи НКТИ. Это возможно, если:

а) геометрическая форма сопряженных деталей определяет благоприятствующее распре-

деление нагрузки по области контакта («нагрузка – контактное давление»);

б) трение в основном осуществляется по зонам дискретного упрочнения с минимально возможным коэффициентом в паре с сопряженной деталью («контактное давление – трение»);

в) материалы деталей пары трения находятся в сочетании, соответствующем принципу Шарпи [6]. В данном случае реализуется двойной принцип Шарпи, так как сопрягаются материалы с различной твердостью не только на разных, но и в пределах одной из них, дискретно упрочненной («трение – износ»);

г) конфигурация профиля износа создает щадящий режим развития нагрузки («износ – нагрузка»).

Создаваемые при этом серии локальных обратных связей преобразуются в глобальный положительный и устойчивый эффект. В то же время концептуальная проработка определяет необходимые предпосылки, но не достаточные условия практической реализации потенциальных преимуществ. Это вынуждает перейти к ряду исследований, описанных далее.

Исследование контактного взаимодействия представительного фрагмента контактирующей пары при дискретно-континуальном упрочнении

Для исследования особенностей контактного взаимодействия рассматривался представительный фрагмент системы взаимодействующих тел (рис. 2а).

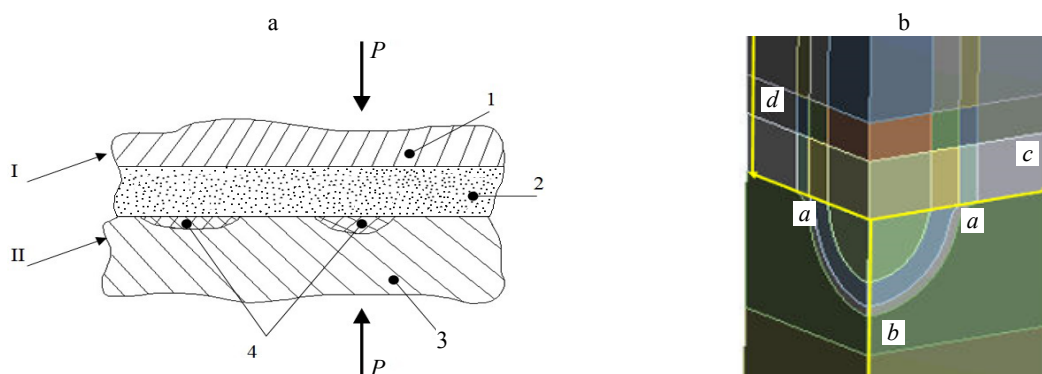


Рис. 2. Комплексная технология, объединяющая дискретное и континуальное упрочнение:
 а – I – континуально упрочненная деталь из сплава АК4 (1) и ее поверхностный слой (2),
 II – деталь (основной материал – сталь, чугун (3)), обработанная методом дискретного упрочнения по зонам (4);
 б – часть геометрической модели с варьируемым параметром a

Fig. 2. Complex technology combining discrete and continual strengthening:
 а – I – continuously strengthened AK4-alloy part (1) and its surface layer (2),
 II – part (base material – steel, cast iron (3)), processed by discrete strengthening method for zones (4);
 б – part of geometric model with variable parameter a

Рис. 2 содержит фрагмент материала детали, обработанной по технологии дискретного упрочнения, с одной стороны, и детали с зоной гальвано-плазменного оксидирования (ГПО) [7] – с другой. При проведении исследования были рассмотрены различные геометрические модели, которые описывали 1/4 часть выделенного участка материала, содержащего ячейку, образованную после технологической обработки дискретного упрочнения поверхности. Для построения геометрической модели исследуемого объекта использовался программный комплекс SolidWorks, а для численных исследований напряженно-деформированного состояния – ANSYS.

Проведено варьирование коэффициента дискретного упрочнения (т. е. отношения площади упрочненных зон к общей площади поверхности детали). Исследование выполнено за счет изменения размеров детали за пределами зоны дискретного упрочнения.

Данное исследование состояло из двух этапов. На первом рассматривался сектор с ячейкой (зоной дискретного упрочнения) под действием внешнего давления, на втором – контактное взаимодействие этой ячейки и элемента сопряженного тела.

На рис. 2b представлена часть геометрической модели с обозначенным параметром варьирования (a). Габаритные размеры моделей для каждого из этапов: длина стороны $a = 0,10\text{--}0,64$ мм,

высота нижней части $b = 2,0$ мм, толщина слоя ГПО $c = 0,3$ мм, высота верхней части $d = 2,3$ мм. При этом ячейка состояла из трех частей, толщины внешних частей составляли 1/10 и 1/4 часть радиуса ячейки соответственно.

В целом построены восемь расчетных схем для первого этапа исследования (P_1–P_8). Первые семь имели различные геометрические размеры при соответствующих физико-механических свойствах материалов с учетом дискретного упрочнения. Схема P_8 соответствовала схеме P_1 по геометрическим размерам, но без учета физико-механических свойств дискретно упрочненной зоны. Для второго этапа было построено десять расчетных схем. Первые семь предполагали варьирование параметра a с учетом физико-механических свойств для дискретно упрочненной зоны и слоя ГПО. Восьмая расчетная схема построена без учета свойств дискретно упрочненной зоны (назначались свойства основного материала – чугун), но с учетом свойств материала, полученных при использовании ГПО; девятая расчетная схема – без учета физико-механических свойств, полученных при использовании ГПО (назначались свойства основного материала – алюминиевый сплав АК4), но с учетом свойств дискретно упрочненной зоны; десятая расчетная схема – без учета свойств дискретно упрочненной зоны и без свойств, полученных при использова-

нии ГПО, обоим элементам назначались свойства основного материала, соответственно чугуна и сплава АК4. В качестве нагрузки прикладывалось давление 100 МПа к верхней поверхности для всех расчетных схем, а нижняя поверхность фиксировалась. Также на модель накладывались условия симметрии на все боковые поверхности.

Построенная модель второго этапа является многослойной. Помимо увеличения количества зон с различными характеристиками, была также увеличена размерность конечно-элементной модели. Это вызвано тем, что результаты исследований, выполненных на предыдущих этапах работы [6], демонстрировали определенную неравномерность распределения механических и физико-механических свойств материала в зоне дискретного упрочнения.

Построенные конечно-элементные модели насчитывали около 160 тыс. элементов для моделей первого этапа и 200 тыс. элементов – для второго. Таким образом, объем вычислительных работ при осуществлении компьютерного моделирования вырос многократно, а соответ-

ственно возросли требования к необходимым вычислительным ресурсам. Для решения задачи использованы мощности компьютерного кластера «Политехник-125», который действует в НТУ «Харьковский политехнический институт» (64 процессорных ядра, 128 Гб оперативной памяти).

По итогам проведенных исследований определялись компоненты напряженно-деформированного состояния, перемещений, коэффициент запаса.

Результаты численных исследований

Диаграммы с максимальными значениями эквивалентных напряжений для элементов модели представлены на рис. 3а и 4а. Номера столбцов в присоединенных таблицах соответствуют номерам элементов системы взаимодействующих тел, представленных на рис. 2а. Аналогичные диаграммы с полными перемещениями получены и для моделей, отличавшихся по физико-механическим свойствам. Они приведены на рис. 3б и 4б.

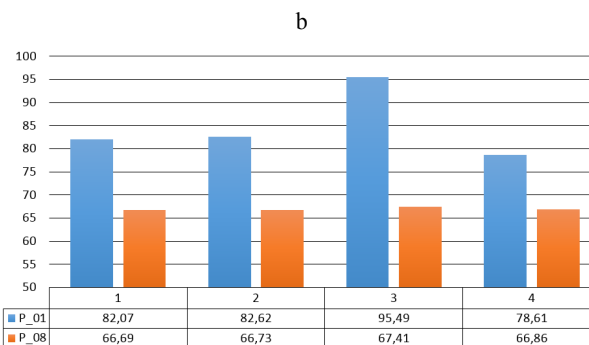
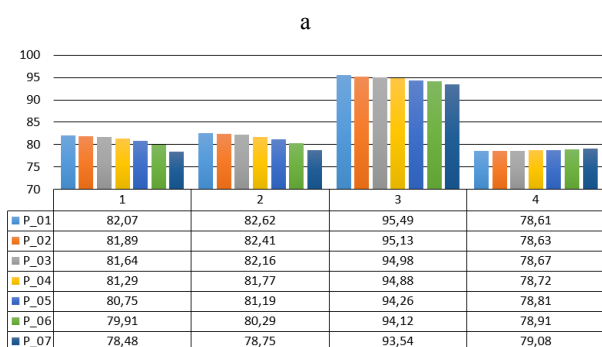


Рис. 3. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу (МПа)

Fig. 3. Maximum equivalent stresses according to von Mises (MPa)

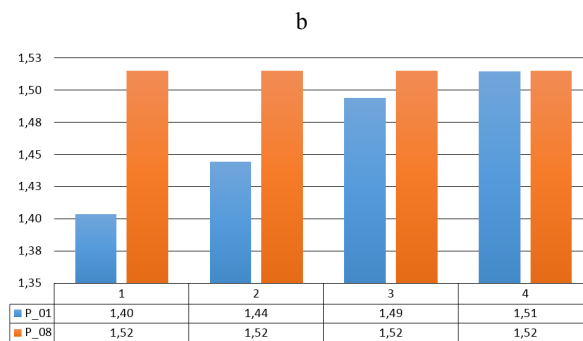
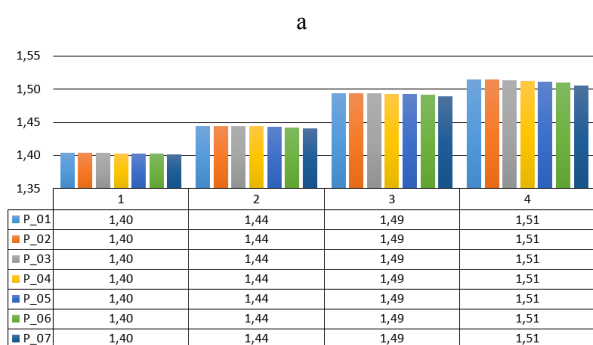


Рис. 4. Максимальные полные перемещения (мкм)

Fig. 4. Maximum total displacement (μm)

При этом подтверждены результаты предыдущих исследований [6], полученные на моделях более простого уровня. Однако уточнено распределение компонент напряженно-деформированного состояния за счет построения и использования в исследованиях более масштабных моделей.

В результате проведенных исследований установлено следующее.

1. Построенные и примененные конечно-элементные модели продемонстрировали выравнивание характера распределения компонент напряженно-деформированного состояния по сравнению с полученными при использовании более простых моделей.

2. Подтверждено, что зоны дискретного упрочнения при приложении нагрузки несколько выступают над номинальным уровнем поверхности дискретно упрочненной детали. Таким образом, более интенсивное взаимодействие между контактирующими телами осуществляется преимущественно через зоны дискретного упрочнения. Этот эффект, названный в [6] Δ -эффект, создает благоприятные условия для работы контактирующих деталей.

3. Подтвердился ранее обнаруженный авторами так называемый σ -эффект [6], который заключается в повышении общего запаса прочности за счет перераспределения контактного давления на зоны дискретного упрочнения, материал которых имеет значительно более высокие механические свойства по сравнению с основным материалом детали.

4. Установлено, что рациональным является коэффициент дискретного упрочнения на уровне $\varphi = 0,60-0,75$ от общей площади упрочнения.

5. При предложенном дискретно-континуальном методе упрочнения все характерные особенности и эффекты от применения дискретного упрочнения сохраняются, однако добавляются новые качества за счет наличия слоя ГПО на ответной детали. В данном случае имеет место приработка не ответной детали к дискретно упрочненной, а именно дискретно упрочненной. Это позволяет обеспечить заданную величину зазора после приработки трущихся поверхностей в соответствии с рис. 1б. Толщина преобразованного слоя методом ГПО на по-

верхности алюминиевой детали рекомендуется в пределах 50–70 мкм.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный комплекс исследований с применением методов и средств компьютерного моделирования является существенной основой для обеспечения эффективных технологических решений дискретно-континуального упрочнения.

2. Анализ результатов исследований дает основание для общего вывода о работоспособности и экономической эффективности предложенного метода упрочнения трущихся высоконагруженных деталей.

3. Режимы технологических процессов (напряжение, длительность импульсов, сила тока и т. п.) для рассматриваемого процесса упрочнения требуют конкретизации в каждом случае исходя из условий работы, вида материала, действующих контактных давлений, скоростей относительного движения в паре трения и т. п. При этом методологическая основа таких исследований уже создана. На основании полученных результатов предложены решения для реализации новых способов упрочнения пар трения [12].

4. Дальнейшее направление работ связано с разработкой узлов трения с комбинированным применением технологий дискретного упрочнения и гальвано-плазменного оксидирования, проведения соответствующих натурных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяченко, С. С. Влияние генезиса модифицированного поверхностного слоя на конструктивную прочность изделий / С. С. Дьяченко, И. В. Пономаренко // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118, № 6. С. 608–620.
2. Haruyoshi, Kubo. Technical Developments and Recent Trends in Crankshaft Materials [Electronic Resource] / Haruyoshi Kubo, Hiroyuki Mori // Journal of the Japan Institute of Marine Engineering. 2005. Vol. 40, Is. 2. P. 248–253. https://doi.org/10.5988/jime.40.2_248.
3. Application of High Strength Microalloyed Steel in a New Automotive Crankshaft [Electronic Resource] / Young Sang Ko [et al.]. 2006. Mode of access: <https://www.forging.org/uploaded/content/media/298-Ko.pdf>.

4. Solov'ev, R. Y. Metal-Carbothermal Methods of Reducing the Degree of Oxidation of Dispersed Metal in Electric ARC Metallizing / R. Y. Solov'ev, P. A. Vorob'yev, N. N. Litovchenko // *Welding International*. 2013. Vol. 27, No 5. P. 423–427.
5. Ivanov, V. I. Hardening of Objects and the Increase of their Lifetime by the Electrospark Method: the Object Classification and the Specific Features of the Technology / V. I. Ivanov, F. K. Burumkulov // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010. Vol. 46, No 5. P. 416–423.
6. Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей / Н. А. Ткачук [и др.]. Харьков: Щедра садиба плюс, 2015. 259 с.
7. Method of Producing Corundum Layer on Metal Parts [Electronic Resource]: Patent US 2006/0207884 A1 / V. Shpakovsky, I. Shpakovsky, A. Beleske. Publ. date: Sep. 21, 2006. Mode of access: <https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20060207884.pdf>.
8. Комбинированные технологии повышения износостойкости высоконагруженных пар трения / С. Кравченко [и др.] // *Systemy i Środki Transportu Samochodowego. Wybrane Zagadnienia. Monografia No 5. Seria: Transport. Rzeszów: Politechnika Rzeszowska*, 2014. P. 269–280.
9. Papangelo, A. Load-Separation Curves for the Contact of Self-Affine Rough Surfaces / A. Papangelo, N. Hoffmann, M. Ciavarella // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, No 1. 6900 с.
10. Kozachok, O. P. Interaction of Two Elastic Bodies in the Presence of Periodically Located Gaps Filled with a Real Gas / O. P. Kozachok, B. S. Slobodian, R. M. Martynyak // *Journal of Mathematical Sciences*. 2017. Vol. 222, No 2. P. 131–142.
11. Numerical Tools for Analysis of Complex-Shaped Bodies in Mechanical Contact / M. A. Tkachuk [et al.] // *Book of Proceedings of the 56th International Conference of Machine Design Departments (ICMD 2015)*. P. 393–398.
12. Підшипниковий вузол: пат. на полезну модель України, F16C 9/00 № u 201800599 / А. П. Марченко, С. О. Кравченко, В. О. Пильов, М. А. Ткачук. Заявл. 22.01.2018.
2. Haruyoshi Kubo, Hiroyuki Mori (2005) Technical Developments and Recent Trends in Crankshaft Materials. *Journal of the Japan Institute of Marine Engineering*, 40 (2), 248–253. https://doi.org/10.5988/jime.40.2_248.
3. Young Sang Ko, Jin Woo Park, Hyounsoo Park, Jong Dae Lim (2006) Application of High Strength Microalloyed Steel in a New Automotive Crankshaft. Available at: <https://www.forging.org/uploaded/content/media/298-Ko.pdf>.
4. Solov'ev R. Y., Vorob'yev P. A., Litovchenko N. N. (2013) Metal-Carbothermal Methods of Reducing the Degree of Oxidation of Dispersed Metal in Electric ARC Metallizing. *Welding International*, 27 (5), 423–427. <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.715930>.
5. Ivanov V. I., Burumkulov F. K. (2010) Hardening of Objects and the Increase of their Lifetime by the Electrospark Method: the Object Classification and the Specific Features of the Technology. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 46 (5), 416–423. <https://doi.org/10.3103/s1068375510050042>.
6. Tkachuk N. A., D'yachenko S. S., Posvyatenko E. K., Kravchenko S. A., Goncharov V. G., Shpakovskii V. V., Belov N. L., Sheiko A. I., Oleinik A. K., Ponomarenko I. V. (2015) *Continuum and Discrete-Continuum Modification of Surface in Parts*. Kharkiv, Shchedra Sadiba Plyus Publ. 259 (in Russian).
7. Shpakovsky V., Shpakovsky I., Beleske A. (2006) *Method of Producing Corundum Layer on Metal Parts*. Patent United States No US 2006/0207884 A1. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20060207884.pdf>.
8. Kravchenko S. [et al.] (2014) Combined Technologies for Increasing Wear-Resistance of Highly-Loaded Friction Pair. *Systemy i Środki Transportu Samochodowego. Wybrane Zagadnienia. Monografia No 5. Seria: Transport. Rzeszów: Politechnika Rzeszowska*, 269–280.
9. Papangelo A., Hoffmann N., Ciavarella M. (2017) Load-Separation Curves for the Contact of Self-Affine Rough Surfaces. *Scientific Reports*, 7 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07234-4>.
10. Kozachok O. P., Slobodian B. S., Martynyak R. M. (2017) Interaction of Two Elastic Bodies in the Presence of Periodically Located Gaps Filled with a Real Gas. *Journal of Mathematical Sciences*, 222 (2), 131–142. <https://doi.org/10.1007/s10958-017-3287-6>.
11. Tkachuk M. A., Skripchenko N., Grabovskiy A., Tkachuk M. M. (2015) Numerical Tools for Analysis of Complex-Shaped Bodies in Mechanical Contact. *Book of Proceedings of the 56th International Conference of Machine Design Departments (ICMD 2015)*. Slovak University of Technology Bratislava, 393–398.
12. Marchenko A. P., Kravchenko S. O., Pilyov V. O., Tkachuk M. A. (2018) *Ball-Bearing Unit: Application No u 201800599* (in Ukrainian).

Поступила 04.04.2018

Подписана в печать 09.07.2018

Опубликована онлайн 30.05.2019

REFERENCES

1. Dyachenko S. S., Ponomarenko I. V. (2017) Effect of the Origin of the Modified Surface Layer on the Structural Strength of Workpieces. *Physics of Metals and Metallography*, 118 (6), 608–620. <https://doi.org/10.1134/s0031918x17060035>.

Received: 04.04.2018

Accepted: 09.07.2018

Published online: 30.05.2019