

УДК 612.431.75

Титов А. В.  
Шмелёва Л. В.  
Кириенко Е. А.  
Герасимова О. В.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВТОРНОЙ ОПЕРАЦИИ ВЫГЛАЖИВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Повышение надежности и обеспечение ресурса изделий является важнейшей задачей современного машиностроения. Работоспособность машин, их эксплуатационные характеристики в значительной степени зависят от качества поверхностного слоя деталей [1].

Поэтому на финишных стадиях процесса изготовления ответственных деталей проводят обработку поверхностным-пластическим деформированием (ППД) для формирования параметров качества поверхностного слоя (шероховатости, упрочнения, остаточных напряжений и других). Среди множества процессов ППД для особоответственных деталей эффективно применяют процесс алмазного выглаживания [1–4].

Целью работы является моделирование повторной операции выглаживания методом конечных элементов. Данная статья является продолжением работы [5], в которой было проведено моделирование однократной операции выглаживания методом конечных элементов, а также проведена верификация модели.

На рис. 1 показано формирование поверхностного слоя после прохождения индентора в направлении подачи инструмента. Установлено, что условием сплошности деформационной обработки поверхности детали является соотношение  $S \leq 2l$  (рис. 1, а). Уже при  $l < S < 2l$  появляются зоны I перекрытия следа индентора при вращении детали (рис. 1, б). В этом случае в зонах I материал детали дважды воспринимает деформирующую нагрузку. Это приводит к кратности обработки поверхности за один проход индентора вдоль продольной оси детали.

При  $S \leq l$  зоны I, в которых материал испытал два прохода, чередуются с зонами II, в которых материал был нагружен один раз. Это приводит к неравномерности покрытия пластическим деформированием поверхности детали.

Более благоприятным является случай при  $S = l$ , когда зона I вытесняет зону II, в результате чего индентор дважды (с учетом перекрытия) полностью проходит поверхность детали (рис. 1, в).

При  $S < l$  появляются зоны III, в которых индентор 3 и более раз проходит поверхность детали. В общем случае при  $S = l/n$ , индентор  $2n$  раз повторно деформирует поверхность детали за один проход вдоль ее оси (рис. 1, г).

Уменьшение шага  $S$  приводит к более равномерной пластической проработке поверхности деталей и улучшает ее характеристики. Однако требует учета явлений, которые возникают при повторной обработке поверхности деталей выглаживанием. При значительных деформациях могут возникнуть нарушения сплошности, надрывы, разрушения и другие явления, нежелательные с точки зрения прочности и износостойкости деталей.

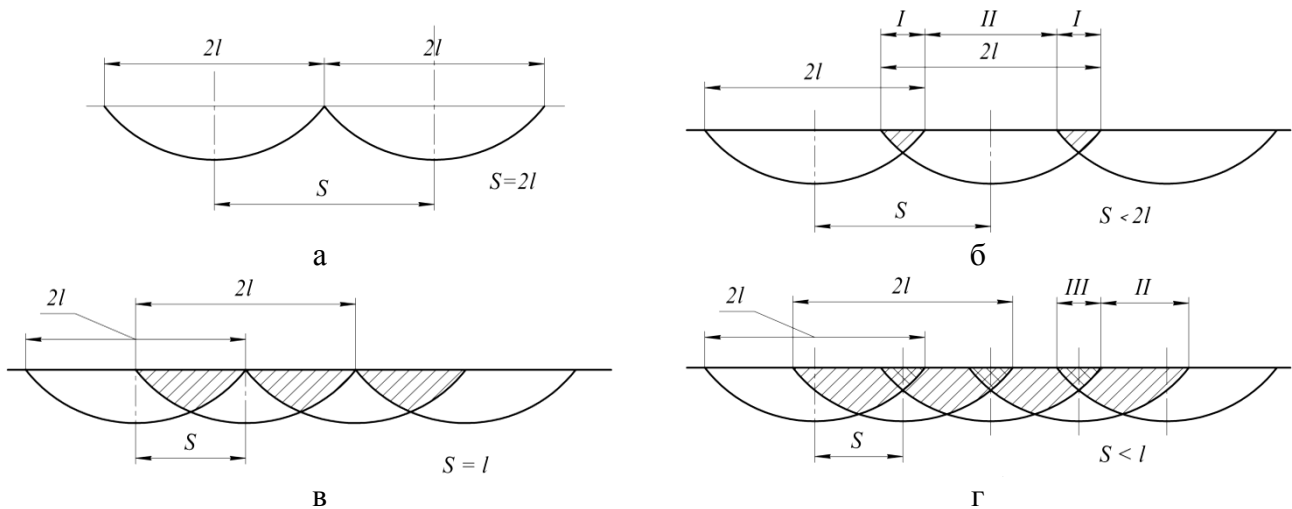


Рис. 1. Кратность пластического деформирования поверхности детали в зависимости от шага подачи

Для теоретического расчета технологических параметров процесса выглаживания поверхность контакта индентора сферической формы с деталью представлена схематично и показана на рис. 2.

Взаимодействие индентора с необработанной поверхностью детали соответствует зоне А, которая ограничена кривой *ab*, а ее величина определяется шагом подачи *S* и радиусом *l* в окружности, зависящей от глубины внедрения индентора (см. рис. 2).

Взаимодействие индентора с рельефом детали, который образован на предыдущем проходе, соответствует зоне Б, которая ограничена эллиптической кривой *bc*.

Контакт индентора с упруго-восстановленной поверхностью детали после прохода инструмента соответствует зоне В (см. рис. 2).

Принятая аппроксимация площадки контакта (см. рис. 2) обосновывается общими представлениями о площадках контакта, которые сформулированы в работах [6–8], а также полученными авторами экспериментальными результатами.

Для определения площади пятна контакта используем расчетную схему, приведенную на рис. 2, б в декартовой системе координат. Считаем, что поверхность детали плоская в силу малости пятна контакта.

Часть сферического индентора, контактирующего с поверхностью детали, можно описать уравнением поверхности сферы

$$S_1 : \{x^2 + y^2 + (z - R + H) = R^2, x \geq 0, -H \leq z \leq 0\} \tag{1}$$

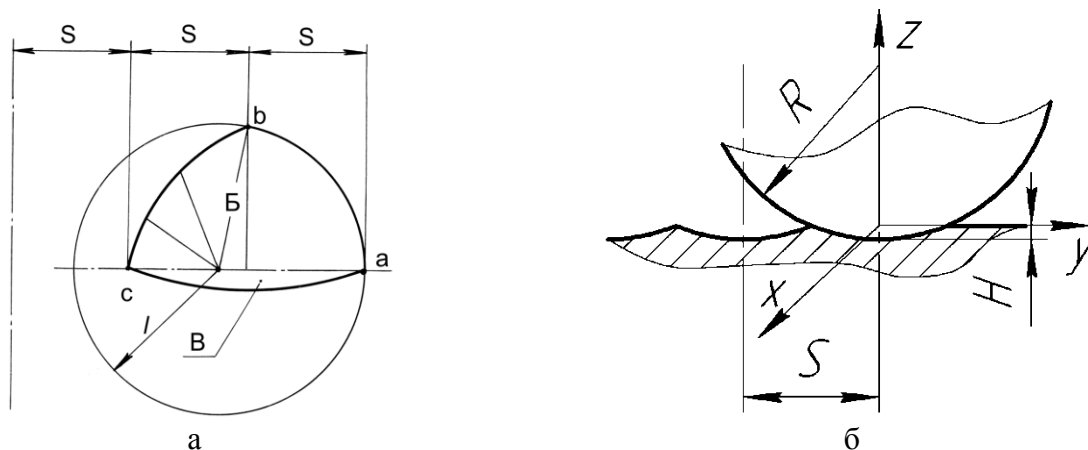


Рис. 2. Поверхность контакта индентора сферической формы с деталью: а – проекция на плоскость поверхности детали; б – расчетная схема

Запишем зависимость  $x(y, z)$ , используя определение поверхности (1)

$$x = \sqrt{R^2 - y^2 + (z - R + H)^2} \quad (2)$$

Для определения площади поверхности контакта нам необходимо вычислить двойной интеграл

$$S = \iint_{S_1} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)^2} \quad (3)$$

Определим границы интегрирования, проецируя сферу на плоскость  $YOZ$  до пересечения с плоскостью детали и проекции цилиндрической поверхности, образованной при предыдущем проходе индентора.

Подставляя (2) в (3) получим

$$S = R \left( \int_{-S/2}^{\sqrt{2HR-H^2+S}} dy \int_{-\sqrt{R^2-(y+S)^2+R-H}}^{-\sqrt{R^2-y^2+R-H}} \frac{dz}{\sqrt{R^2-y^2-(z-R+H)^2}} + \int_{\sqrt{2HR-H^2-S}}^{\sqrt{2HR-H^2}} dy \int_{-\sqrt{R^2-y^2+R-H}}^0 \frac{dz}{\sqrt{R^2-y^2-(z-R+H)^2}} \right) \quad (4)$$

Определение площади в соответствии с (4) выполнялось численными методами.

Как известно, обработка алмазным выглаживанием может проводиться повторно по уже обработанной поверхности. При этом увеличивается величина остаточных напряжений сжатия и глубина их залегания. Количество проходов может не ограничиваться двумя, а при различных случаях достигать пяти. Моделирование повторной обработки производилось для анализа изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) после повторной обработки алмазным выглаживанием.

Для моделирования использовалась уже апробированная [5] конечно-элементная модель.

Расчет проводился в следующей последовательности:

1. Внедрение сферического индентора.
2. Движение его с пластическим деформированием детали.
3. Разгрузка и возврат инструмента в исходное положение.
4. Повторная обработка, соответствующая пп. 1–3, с учетом остаточных напряжений, приведенных на первом этапе обработки (пп. 1–3).

На рис. 3–4 показаны изолинии распределения активных эквивалентных напряжений и деформаций, а также (рис. 5–10) компонент тензора напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}$  и деформаций  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ .

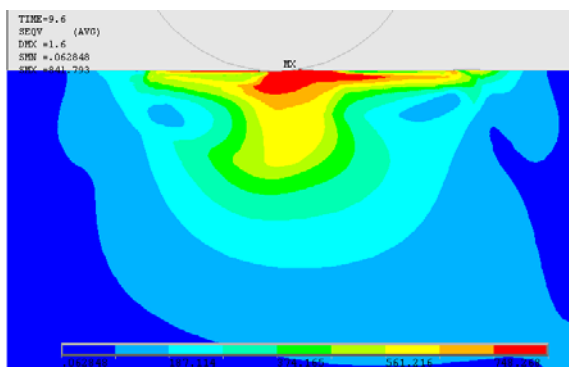


Рис. 3. Распределение напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  в образце под нагрузкой

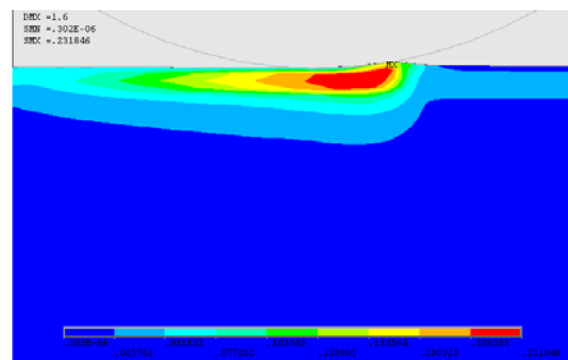


Рис. 4. Распределение деформаций  $\varepsilon_{\text{экв}}$  в образце под нагрузкой

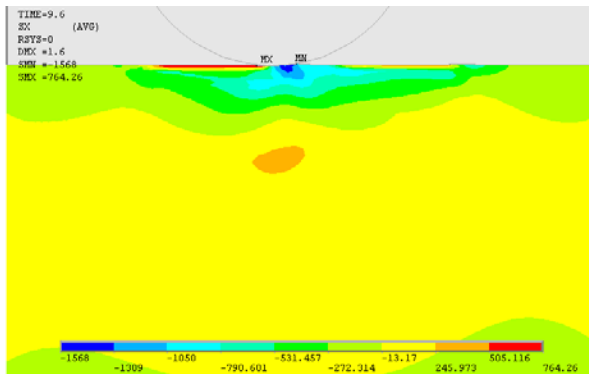


Рис. 5. Распределение напряжений  $\sigma_x$  в образце под нагрузкой

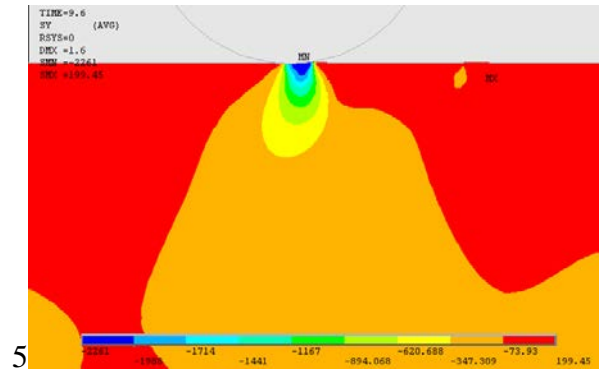


Рис. 6. Распределение напряжений  $\sigma_y$  в образце под нагрузкой

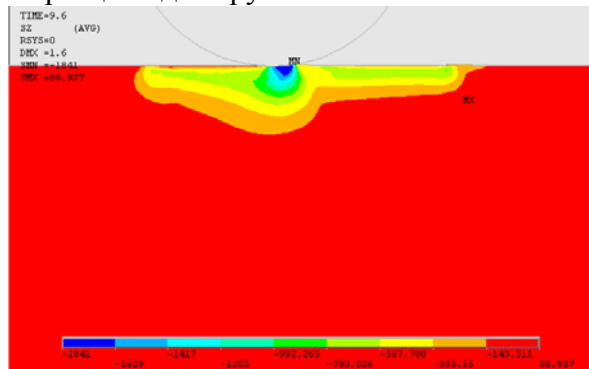


Рис. 7. Распределение напряжений  $\sigma_z$  в образце под нагрузкой

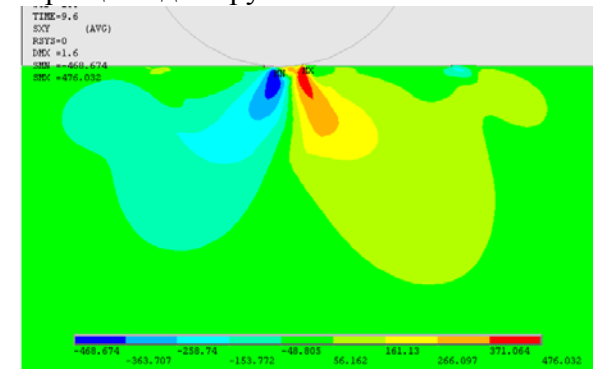


Рис. 8. Распределение напряжений  $\tau_{xy}$  в образце под нагрузкой

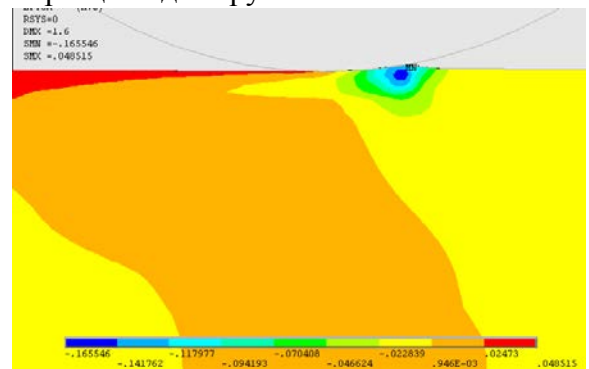


Рис. 9. Распределение деформаций  $\epsilon_x$  в образце под нагрузкой

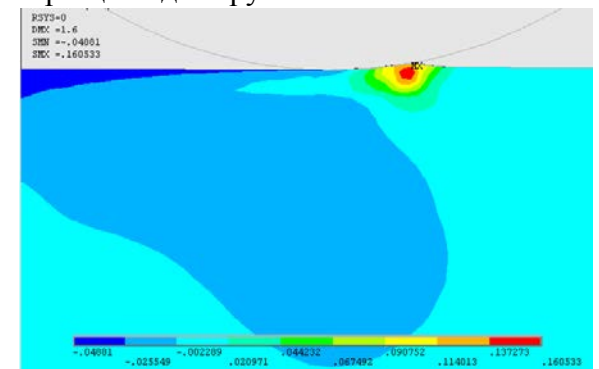


Рис. 10. Распределение деформаций  $\epsilon_y$  в образце под нагрузкой

На рис. 11–12 показаны изолинии распределения компонент тензора остаточных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$ .

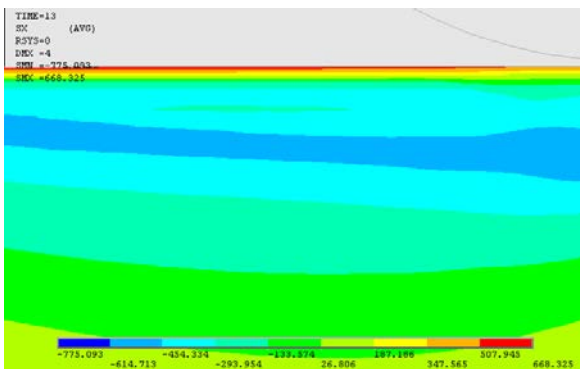


Рис. 11. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_x$  в образце

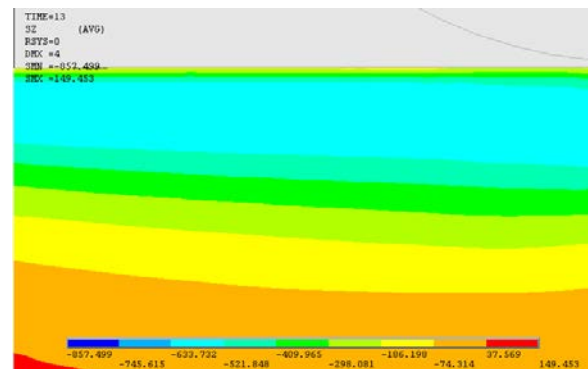


Рис. 12. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_z$  в образце

На рис. 13 приведен график распределения остаточных напряжений после повторной обработки алмазным выглаживанием по сравнению с первым проходом. Как видно из графика, после второго прохода при выглаживании наблюдается увеличение остаточных напряжений на 10–15 %, и незначительно уменьшается глубина их залегания.

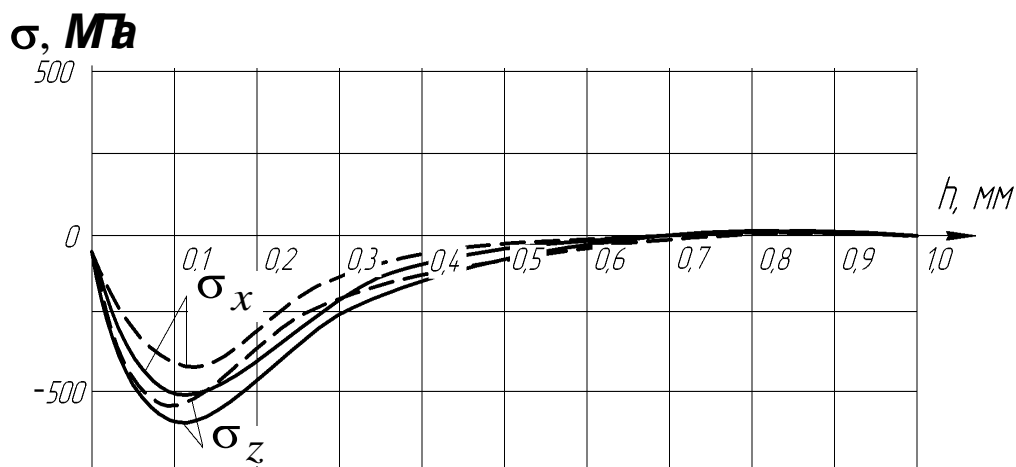


Рис. 13. График распределения остаточных напряжений после первого (—) и второго (---) проходов алмазным выглаживанием

Последующие проходы практически не изменяют величину остаточных напряжений (не более 4–6 %), что хорошо согласуется с экспериментальными результатами, полученными в статье [2].

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена кинематика взаимодействия индентора с деталью при выглаживании. Показано, что при движении индентора по поверхности детали сглаживаются исходные неровности поверхности. Условие сплошности покрытия поверхности детали является то, что шаг подачи индентора при выглаживании меньше, чем диаметр пятна контакта  $S \leq 2l$ . При  $S < 2l$  появляются зоны перекрытия следа индентора за один проход вдоль продольной оси детали, что приводит к кратности обработки поверхности. Установлено, что при  $S = l/n$  индентор  $2n$  раз повторно деформирует поверхностный слой детали за один проход вдоль ее оси. В результате поверхностного пластического деформирования происходит сглаживание исходных микронеровностей, образование нового рельефа со значительно меньшей высотой и упорядоченным профилем микронеровностей.

2. Разработана и обоснована уточненная модель, позволяющая определять все компоненты тензора действующих и остаточных напряжений при различных кратностях обработки выглаживанием. Установлено, что при повторном проходе увеличивается величина остаточных напряжений на 10–15 %. При последующих проходах увеличение остаточных напряжений не превышает 4–6 %.

3. Использование разработанной конечно-элементной модели позволяет прогнозировать свойства поверхностного слоя обработанных материалов и технологические параметры при различных кратностях обработки выглаживанием деталей.

4. Определена площадь пятна контакта инструмента с деталью при выглаживании, что позволяет определять оптимизированные силовые режимы для обеспечения параметров качества поверхностного слоя детали с использованием конечно-элементной модели.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка оптимизированных технологических параметров процесса алмазного выглаживания при изготовлении валов ГТД / В. Ф. Мозговой, А. Я. Качан, В. А. Титов [и др.] // Технологические системы. – К. :2001. – № 5. – С. 78–85.

2. *Мозговой В. Ф. Особенности комплексной оценки деформационных параметров поверхностного слоя при изготовлении тонкостенных валов ГТД / В. Ф. Мозговой, А. Я. Качан, В. А. Титов // Технологические системы. – К. : 2000.–№ 2. – С. 56–66.*
3. *Титов В. А. Методика выбора режимов выглаживания деталей в условиях трений, близких к гидродинамическому / В. А. Титов, А. В. Титов // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 46. – С. 61–67.*
4. *Богуслаев В. А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, В. Ф. Притченко. – К. : Манускрипт, 1993. – 333 с.*
5. *Титов А. В. Моделирование процесса алмазного выглаживания с использованием системы ANSYS / А. В. Титов, С. В. Мозговой, А. Я. Качан // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 4. – С. 90–96.*
6. *Торбило В. М. Алмазное выглаживание / В. М. Торбило. – М. : Машиностроение, 1972. – 105 с.*
7. *Чепя П. А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / П. А. Чепя. – Минск : Наука и техника, 1981. – 128 с.*
8. *Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. – М. : Машиностроение, 1978. – 152 с.*

## REFERENCES

1. *Ocenka optimizovanyh tehnologicheskikh parametrov processaalmaznogo vyglazhivaniya pri izgotovlenii valov GTD / V. F. Mozgovoy, A. Ja. Kachan, V. A. Titov [i dr.] // Tehnologicheskie sistemy. – K. :2001. – № 5. – S. 78–85.*
2. *Mozgovoy V. F. Osobennosti kompleksnoy ocenki deformatsionnyh parametrov poverhnostnogo sloja pri izgotovlenii tonkostennyh valov GTD / V. F. Mozgovoy, A. Ja. Kachan, V. A. Titov // Tehnologicheskie sistemy. – K. : 2000.–№ 2. – S. 56–66.*
3. *Titov V. A. Metodika vybora rezhimov vyglazhivaniya detalej v uslovijah trenij, blizkih k gidrodinamicheskomu / V. A. Titov, A. V. Titov // Visnik NTU «HPI». Tematichnij vipusk: Novi rishennja v suchasnihtehnologijah. – Harkiv : NTU «HPI», 2011. – № 46. – S. 61–67.*
4. *Boguslaev V. A. Tehnologicheskoe obespechenie i prognozirovanie nesushhej sposobnosti detalej GTD / V. A. Boguslaev, V. K. Jacenko, V. F. Pritchenco. – K. : Manuskript, 1993. – 333 s.*
5. *Titov A. V. Modelirovanie processaalmaznogo vyglazhivaniya s ispol'zovaniem sistemy ANSYS / A. V. Titov, S. V. Mozgovoj, A. Ja. Kachan // Vestnik dvigatelestroenija. – 2006. – № 4. – S. 90–96.*
6. *Torbilo V. M. Almaznoe vyglazhivanie / V. M. Torbilo. – M. : Mashinostroenie, 1972. – 105 s.*
7. *Chepa P. A. Tehnologicheskie osnovy uprochnenija detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovanijem / P. A. Chepa. – Minsk : Nauka i tehnika, 1981. – 128 s.*
8. *Papshev D. D. Otdelochno-uprochnjajushhaja obrabotka poverhnostnym plasticheskim deformirovanijem / D. D. Papshev. – M. : Mashinostroenie, 1978. – 152 s.*

Титов А. В. – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ»;

Шмелева Л. В. – канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник КНУ им. Т. Г. Шевченко;

Кириенко Е. А. – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ»;

Герасимова О. В. – инженер НАУ.

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина;

КНУ им. Т. Г. Шевченко – Киевский национальный университет им. Т. Г. Шевченко, г. Киев, Украина;

НАУ – Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина.

E-mail: avt.kpi@gmail.com