

УДК 620.22:621.763–037.47

О. В. ГЕРАСИМОВА<sup>1</sup>, А. В. ТИТОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет, Украина

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА СФЕРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЕТАЛИ ПРИ ВЫГЛАЖИВАНИИ

*В настоящей статье решена задача определения площадки контакта сферического индентора с поверхностью детали при выглаживании, что позволило обеспечить высокую чувствительность расчета НДС и остаточных напряжений, например при повторном выглаживании. Разработана и обоснована уточненная модель для расчета процесса выглаживания конечноэлементным методом, которая позволяет определить все компоненты тензора действующих и остаточных напряжений при различных кратностях обработки выглаживанием. Показаны также результаты расчета распределения контактных напряжений на поверхности контакта инструмента и детали. Это дает возможность более точно оценить условия трения на контактной площадке, что необходимо для управления режимами взаимодействия инструмента и детали.*

**Ключевые слова:** алмазное выглаживание, площадка контакта сферического индентора и детали, остаточные напряжения, поверхностный слой, повторная обработка, сферический индентор.

**Введение.** Эффективность изделий машиностроения зависит от качества изготовления конструкции, ее надежности и ресурса, что обеспечивается технологическими процессами изготовления элементов конструкции. Одним из ключевых процессов, который увеличивает ресурс, является выглаживание поверхностного слоя элементов конструкций [1].

Правильный выбор технологических параметров процесса выглаживания зависит от точности расчета процесса при определении НДС поверхностного слоя. Что в свою очередь обеспечивает решение контактной задачи инструмента и детали – контактных напряжений и условий трения. Точность расчета контактной задачи взаимодействия сферического индентора с поверхностью детали аналитическими или численными методами зависит от точности описания площадки их контакта. В настоящей статье решена задача определения площадки контакта сферического индентора с поверхностью детали при выглаживании сферическим индентором.

**Постановка задачи.** Для расчета технологических параметров процесса выглаживания аналитическими или численными методами поверхность контакта индентора сферической формы с деталью можно схематично представить линиями пересечения поверхностей инструмента с поверхностью детали, как это показано на рис. 1.

Взаимодействие индентора с необработанной поверхностью детали соответствует зоне  $A$ , которая ограничена кривой  $ab$ , а ее величина определяется шагом подачи  $S$  и радиусом  $l$  в окружности, зависящей от глубины внедрения индентора (рис. 1).

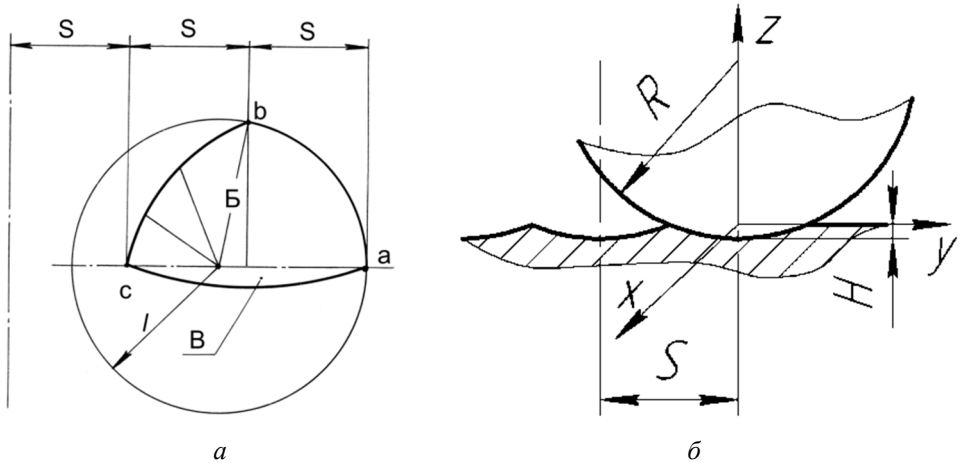


Рис. 1. Поверхность контакта индентора сферической формы с деталью: *a* – проекция на плоскость поверхности детали; *б* – расчетная схема

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. 1).

Принятая аппроксимация площадки контакта (см. рис. 1) обосновывается общими представлениями о площадках контакта, которые сформулированы в работах [2; 3; 4], а также полученными автором экспериментальными результатами.

**Решение поставленной задачи.** Для определения площади контакта используем расчетную схему приведенную на рис. 1, *б* в декартовой системе координат. Считаем, что поверхность детали плоская, в силу малости площади контакта.

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

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

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 по площади

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

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

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

Определение площади в соответствии с (4) позволило уточнить расчеты конечно-элементных моделей для процесса выглаживания при анализе напряженно-деформированного состояния (НДС).

Уточнение поверхности контакта сферического инструмента и поверхности детали позволило обеспечить высокую чувствительность расчета НДС и остаточных напряжений, например при повторном выглаживании.

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 алмазным выглаживанием производилось для анализа изменения НДС материала поверхностного слоя деталей.

Расчет проводился в следующей последовательности:

Внедрение сферического индентора в поверхностный слой материала детали;

Движение индентора вдоль поверхностного слоя с пластическим деформированием детали;

Разгрузка и возврат инструмента в исходное положение;

Повторная обработка соответствующая пп. 1-3, с учетом остаточных напряжений наведенных на первом этапе обработки (пп. 1-3).

Распределение остаточных напряжений после повторной обработки алмазным выглаживанием по сравнению с первым проходом показан на рис. 2.

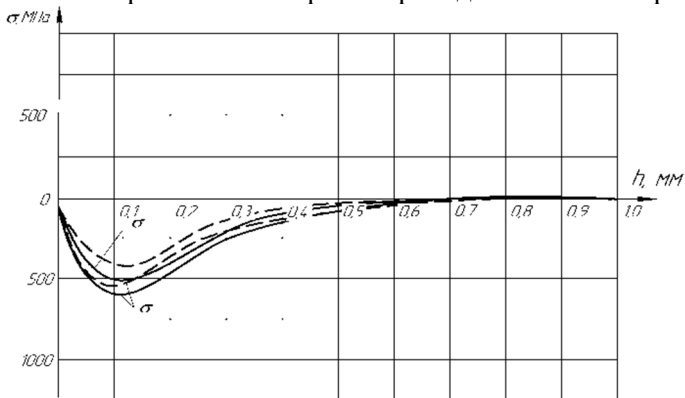


Рис. 2. График распределения остаточных напряжений после первого (---) и второго (—) проходов алмазным выглаживанием

После второго прохода выглаживанием наблюдается увеличение остаточных напряжений на 10-15 % и незначительно уменьшается глубина их залегания.

**Выводы.** На основании общих представлений и экспериментальных резуль-

татов авторов установлены реальные границы части сферического индентора, контактирующего с поверхностью детали при выглаживании. Получена математическая модель поверхности контакта и определена площадь поверхности контакта инструмента с деталью.

Расчет НДС позволяет также определить величину контактных напряжений на поверхностях контакта индентора и детали. Это дает возможность более точно оценить условия трения на контактной поверхности для расчета взаимодействия индентора и детали, как это сделано в работе автора [5].

Разработана и обоснована уточненная модель, позволяет определять все компоненты тензора действующих и остаточных напряжений 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%.

Использование разработанной конечноэлементной модели позволяет прогнозировать свойства поверхностного слоя обработанных материалов и технологические параметры различных кратностях обработки выглаживанием деталей.

Уточненная площадь контакта инструмента с деталью при выглаживании позволяет с использованием конечноэлементной модели определять оптимизированные силовые режимы для обеспечения параметров качества поверхностного слоя детали, распределение нормальных напряжений на площадке контакта дает возможность оценить условия трения для расчета взаимодействия инструмента с деталью.

#### Список літератури

1. Богуслав В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – К.: Манускрипт, 1993. - 333 с.
2. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. - М.: Машиностроение, 1972. - 105 с.
3. Чепя П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – Минск: Наука и техника, 1981. - 128 с
4. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. - М.: Машиностроение, 1978. - 152 с.
5. Герасимова О.В. Аналитическая оценка предельной величины коэффициента трения при использовании металлосодержащей смазки в процессах выглаживания / О.В. Герасимова, В.А. Титов – Проблемы тертя та зношування, 2017, № 73. – С. 90-96.

Стаття надійшла до редакції 09.10.2018.

*О. В. ГЕРАСИМОВА, А. В. ТИТОВ*

### ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩІ КОНТАКТУ СФЕРИЧНОГО ИНДЕНТОРА З ПОВЕРХНЕЮ ДЕТАЛІ ПРИ ВИГЛАДЖУВАННІ

У цій статті вирішена задача визначення площі контакту сферичного індентора з поверхнею деталі при вигладжуванні, що дозволило забезпечити високу чутливість розрахунку НДС і залишкових напружень, наприклад при повторному вигладжуванні. Розроблена і обґрунтована уточнена модель для розрахунку процесу вигладжування скінченноелементним методом, яка дозволяє визначити всі компоненти тензора діючих і залишкових напружень при різних кратностях обробки вигладжуванням. Показані також результати розрахунку розподілу контактних напружень на поверхні контакту інструменту і деталі. Це дає можливість більш точно оцінити умови тертя на контактній поверхні, що необхідно для управління режимами взаємодії інструменту і деталі.

**Ключові слова:** алмазне вигладжування, площина контакту сферичного індентора і деталі, залишкові напруження, поверхневий шар, поверхнева обробка, сферичний індентор.

*O. GERASIMOVA, A. TITOV*

### **DETERMINATION OF CONTACT AREA OF THE SPHERICAL INDENTER WITH SURFACE OF DETAILS IN BURNISHING**

The problem of determining contact area of spherical indenter with the surface of a part during burnishing is solved in this article. It made possible to provide a high sensitivity for calculating the stress-strain state and residual stresses, for example, repeated burnishing. A refined model has been developed and substantiated for calculating the process of burnishing by a finite-element method, which allows determining all components of the tensor of active and residual stresses at various times of burnishing. The results of the calculation of the distribution of contact stresses on the contact surface of the tool and part are also shown. This makes it possible to more accurately assess the friction conditions on the contact surface, which is necessary to control the modes of interaction between the tool and the part.

**Key words:** diamond burnishing, area of contact with spherical identifier and parts, overload, surface ball, repeated processing, spherical indenter.

#### **References**

1. Boguslaev V.A., Yatsenko V.K., Pritchenko V.F. Tehnologicheskoe obespechenie i prognozirovaniye nesuschey sposobnosti detaley GTD. – K.: Manuskript, 1993. – 333 s.
2. Torbilo V.M. Almaznoe vyglazhivaniye. - M.: Mashinostroeniye, 1972. – 105 s.
3. Chepa P.A. Tehnologicheskiye osnoviy uprochneniya detaley poverhnostnyim plasticheskim deformirovaniem. – Minsk: Nauka i tehnika, 1981. – 128 s.
4. Papshev D.D. Otdelochno-uprochnyayuschaya obrabotka poverhnostnyim plasticheskim deformirovaniem. - M.: Mashinostroeniye, 1978. – 152 s.
5. Gerasimova O.V. Analiticheskaya otsenka predelnoy velichiny koeffitsienta treniya pri ispolzovanii metallosoderzhashey smazki v protsessah vyglazhivaniya / O.V. Gerasimova, V.A. Titov – Problemi tertya ta znoshuvannya, 2017, # 73. – S. 90-96.

**Герасимова Ольга В'ячеславівна** – аспірант кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, dellta\_tt@ukr.net

**Тітов Андрій В'ячеславович** – канд. техн. наук, доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», avt.kpi@gmail.com