

Долматов<sup>1</sup> А.И., д.т.н., проф., Кабатов<sup>2</sup> А.А., Курин<sup>1</sup> М.А., к.т.н.

1 - Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина; 2 - Государственное предприятие Харьковский машиностроительный завод «ФЭД», Харьков, Украина;

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛИ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ

Dolmatov<sup>1</sup> A., Kabatov<sup>2</sup> A., Kurin<sup>1</sup> M.

1 - National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine ;

2 - The State Enterprise Kharkiv Engineering Plant "FED", Kharkov, Ukraine;

### THEORETICAL STUDY OF STRAIN OF MATERIAL ITEMS FOR DIAMOND BURNISHING

*Получены зависимости, которые описывают поля скоростей течения частиц металла и скоростей деформаций в материале детали при алмазном выглаживании в любой момент времени. Использование полученных зависимостей позволяет воспроизводить пространственные картины полей скоростей и скоростей деформаций, что показано на конкретном примере. Полученные результаты планируется использовать для дальнейшего исследования процесса алмазного выглаживания при определении таких важных энергосиловых характеристик как мощность и работа пластической деформации, а также температуры в зоне контакта алмазного индентора и детали.*

*Ключевые слова:* алмазное выглаживание, пластическая деформация, диссипация энергии, интенсивность скоростей деформаций, поля скоростей, скорости деформаций.

#### Введение

Развитие современных технологий в авиастроении происходит в условиях повышения эффективности производства и конкурентоспособности выпускаемой продукции. Одним из важных направлений повышения эксплуатационных характеристик деталей авиационных двигателей и агрегатов является разработка новых и совершенствование уже существующих прогрессивных технологических процессов их изготовления. В основном это касается финишных методов обработки деталей, оказывающих решающее влияние на эксплуатационные характеристики поверхностного слоя [1].

Проведенный в работе [1] анализ результатов исследований процессов поверхностного пластического деформирования позволил сделать вывод о перспективности метода алмазного выглаживания. Однако, несмотря на все преимущества, метод не лишен недостатков. Основным препятствием для повышения эффективности алмазного выглаживания является прямо пропорциональная зависимость температуры в зоне контакта от скорости. Поэтому важной задачей является изучение влияния параметров режима обработки на энергосиловые характеристики процесса и стойкость инструмента.

#### Формулирование проблемы

Повышению эффективности алмазного выглаживания различных материалов посвящены многие работы [2, 3, 4, 5]. Так, авторами работ [4, 5] на основании комплексного анализа процесса выглаживания установлены значимые факторы контактного взаимодействия инструмента и заготовки, которые позволяют определять параметры качества деталей в зависимости от реализуемых параметров технологического процесса. На наш взгляд, несмотря на значительную практическую ценность полученных результатов, разработанные математические модели требуют уточнения.

В работе [6] представлена структурно-логическая схема, определяющая методы и последовательность теоретических и экспериментальных исследований. Установлено, что наиболее подходящими для расчета процессов пластического деформирования являются методы, основанные на замкнутой системе уравнений механики сплошных сред [7, 8], которые позволяют производить детальное исследование состояния деформируемого металла в зоне обработки.

Общеизвестно, что основным источником теплообразования при различных процессах механической обработки является работа пластической деформации. Полная работа деформации равна сумме работ изменения объема и изменения формы тела. Пренебрегая изменением объема и используя гипотезу о несжимаемости материала, получим, что работа пластической деформации расходуется на формообразование

детали. Для сплошной среды работа деформирования будет определяться через функцию диссипации энергии, которая определяется интенсивностью скоростей деформаций. В связи с чем требуется детальное исследование деформированного состояния материала заготовки в зоне обработки с целью определения составляющих скоростей деформаций.

### Исследование

Определим закон изменения скорости частиц материала. Рассмотрим схему взаимодействия наконечника с обрабатываемой поверхностью. Условная схема взаимодействия алмазного наконечника с поверхностью детали представлена на рис. 1.

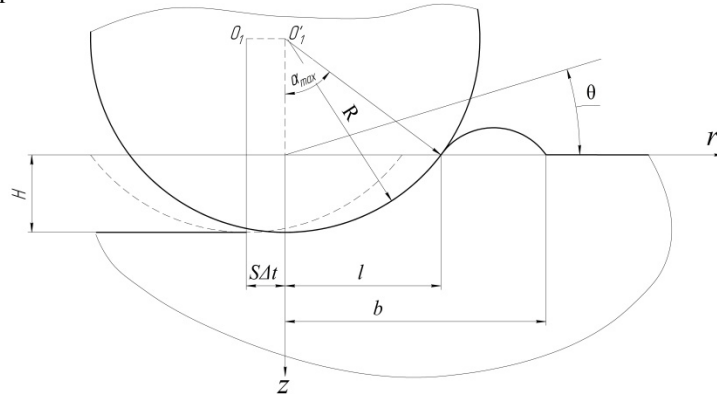


Рис. 1. Схема взаимодействия алмазного наконечника с поверхностью детали

Траекторию точки, принадлежащей обрабатываемой поверхности, можно описать с помощью системы параметрических уравнений

$$\left. \begin{aligned} r &= R \sin \alpha \\ z &= R \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $R$  – радиус индентора.

Представленная система требует пояснения. Рассмотрим угол  $\alpha$  как функцию от времени –  $\alpha = f(t)$ . Найдем зависимость  $\alpha = f(t)$ , считая закон изменения линейным и используя следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \alpha_{\max}(t=0) &= \operatorname{arctg} \left( \frac{\sqrt{2RH - H^2}}{R - H} \right); \\ \alpha_{\min}(t=t_k) &= 0, \end{aligned}$$

где  $t_k$  – время деформирования участка обрабатываемой поверхности;  $H$  – глубина внедрения индентора.

Тогда, исходя из того, что  $\alpha(t) = kt + c$ , получим:

$$\alpha(t) = -\frac{t}{t_k} \operatorname{arctg} \left( \frac{\sqrt{2RH - H^2}}{R - H} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{\sqrt{2RH - H^2}}{R - H} \right) \quad (2)$$

Введем замену  $A = \operatorname{arctg} \left( \frac{\sqrt{2RH - H^2}}{R - H} \right)$ , в таком случае выражение (2) примет следующий вид:

$$\alpha(t) = A \left( 1 - \frac{t}{t_k} \right) \quad (3)$$

Тогда систему уравнений (1) можно переписать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} r &= R \sin \left( A \left( 1 - \frac{t}{t_k} \right) \right) \\ z &= R \cos \left( A \left( 1 - \frac{t}{t_k} \right) \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для анализа деформированного состояния материала детали в процессе выглаживания воспользуемся общими уравнениями механики сплошных сред и полями скоростей перемещений. Исследование деформированного состояния проведем в цилиндрической системе координат, воспользовавшись методикой, предложенной авторами работ [9, 5]. Расчетная схема деформации заготовки в процессе обработки представлена на рис. 1.

Нахождение деформированного состояния возможно лишь в том случае, когда известно поле скоростей частиц металла в очаге деформации. При описании поля скоростей примем следующие допущения:

1) глубина распространения деформаций связана линейной зависимостью с радиусом зоны контакта  $h \approx kl$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $l$  – размер зоны внедрения индентора в радиальном направлении

2) зона распространения деформаций в радиальном направлении определяется равенством  $b = 2l$

3) с учетом осевой симметрии и отсутствия скручивания и перепадов тангенциальная составляющая скорости равна нулю ( $V_\theta = 0$ )

4) вертикальную составляющую скорости ( $V_z$ ) представим в виде произведения двух функций, каждая из которых есть функция только одного аргумента:

$$V_z = f(r)\varphi(z), \quad (5)$$

где  $f(r)$  – функция, характеризующая закон изменения движения частиц металла по координате  $r$ , которая определяется формой инструмента, зоной распространения деформаций и формой гребешка вокруг зоны деформации.

Эта зависимость согласно [9] может быть представлена в виде:

$$f(r) = V_0 \frac{l}{\pi r} \sin \frac{\pi r}{l} \quad (6)$$

где  $V_0$  – скорость движения индентора,  $r$  – координата точки,

Так как на практике традиционно при алмазном выглаживании глубина внедрения сферического наконечника  $H < 0,3R$ , для расчетов можно воспользоваться равенством  $l \approx \sqrt{2RH}$ , где  $H = f(t)$ . В нашем случае  $l = S \cdot t_k$ , где  $S$  – скорость продольной подачи, что видно из рис. 1

Функция  $\varphi(z)$  определяет закон затухания по координате  $z$ . Согласно работе [9] эта функция может быть записана в виде:

$$\varphi(z) = \left(1 - \frac{z}{kSt_k}\right)^2 \quad (7)$$

Найдем скорость перемещения материальных точек вдоль оси  $z$ :

$$V_0 = \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{AR}{t_k} \sin \left( A \left(1 - \frac{t}{t_k}\right) \right) \quad (8)$$

С учетом всего выше сказанного зависимость (6) примет следующий вид:

$$f(r) = \frac{AR}{t_k} \sin \left( A \left(1 - \frac{t}{t_k}\right) \right) \cdot \frac{St_k}{\pi r} \sin \frac{\pi r}{St_k} \quad (9)$$

После подстановки (7) и (9) в формулу (5) окончательно получим выражение для вертикальной составляющей скорости:

$$V_z = \frac{AR}{t_k} \sin \left( A \left(1 - \frac{t}{t_k}\right) \right) \cdot \frac{St_k}{\pi r} \sin \frac{\pi r}{St_k} \cdot \left(1 - \frac{z}{kSt_k}\right)^2 \quad (10)$$

Составляющую поля скоростей течения металла в радиальном направлении  $V_r$  определим из уравнения неразрывности (условия постоянства объема):

$$\operatorname{div} V = 0 \quad (11)$$

В цилиндрической системе координат уравнение (11) примет следующий вид:

$$\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_r}{\partial r} = 0;$$

Таким образом, поле скоростей течения металла в зоне деформаций имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{AR}{t_k} \sin \left( A \left(1 - \frac{t}{t_k}\right) \right) \cdot \frac{St_k}{\pi r} \sin \frac{\pi r}{St_k} \cdot \left(1 - \frac{z}{kSt_k}\right)^2; \\ V_r &= \frac{2ARS}{\pi^2 kr} \sin \left( A \left( \frac{t}{t_k} - 1 \right) \right) \cdot \left( \frac{z}{kSt_k} - 1 \right) \cdot \left( 1 - \cos \frac{\pi r}{St_k} \right); \\ V_\theta &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Для оценки адекватности модельных представлений нагляднее производить анализ полученных зависимостей, представленных графически, при конкретных значениях параметров режима обработки.

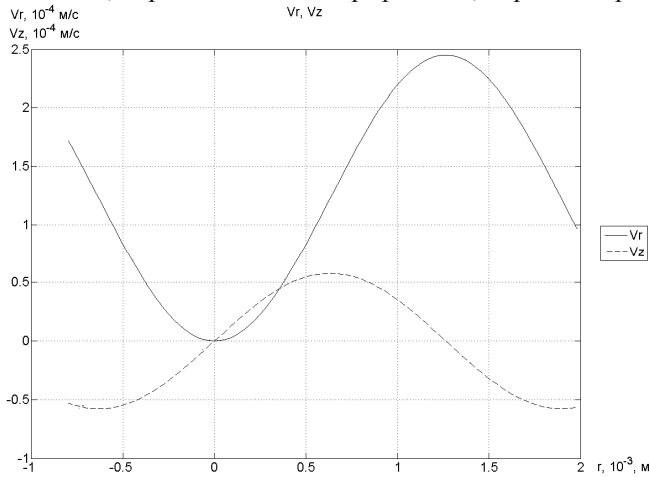


Рис. 2. Зависимость составляющих скорости  $V_r$  и  $V_z$  от координаты  $r$

Построим графики составляющих скорости  $V_r$ ,  $V_z$  при следующих значениях параметров:  $z=0$ ,  $R=2$  мм,  $H=0,45$  мм,  $S=5$  мм/об,  $k=0,3$  (рис. 2). Как видим из рис. 2 вид представленных зависимостей хорошо согласуется с физической моделью процесса обработки, а также с реальной картиной течения материала, наблюдаемой экспериментально. Следует отметить, что здесь и далее значение функциональных характеристик при  $r < 0$ , не имеет физического смысла. Для большей наглядности удобно анализировать пространственную картину распределения скорости, составляющие которой представлены на рис. 3, 4.

Поле скоростей перемещений материальных частиц позволяет определить скорости деформаций [8]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{q_1 q_1} &= \frac{1}{H_1} \frac{\partial V_{q_1}}{\partial q_1} + \frac{\partial V_{q_2}}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial q_2} + \frac{\partial V_{q_3}}{H_1 H_3} \frac{\partial H_1}{\partial q_3} \\ \varepsilon_{q_1 q_2} &= \frac{1}{H_2} \frac{\partial V_{q_1}}{\partial q_2} + \frac{1}{H_1} \frac{\partial V_{q_2}}{\partial q_1} - \frac{V_{q_1}}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial q_1} - \frac{\partial V_{q_2}}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_3} \end{aligned} \quad (13)$$

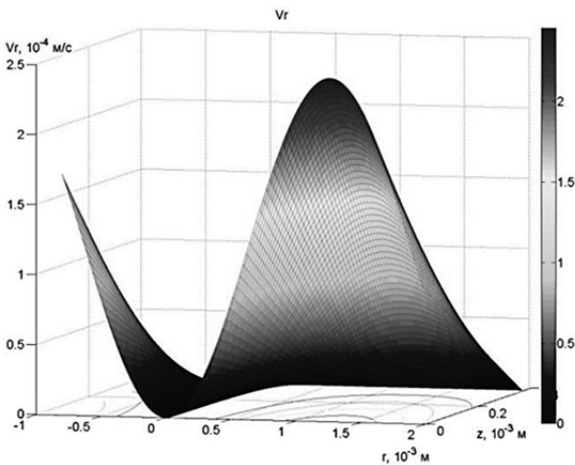


Рис. 3. Радиальная составляющая поля скоростей  $V_r$

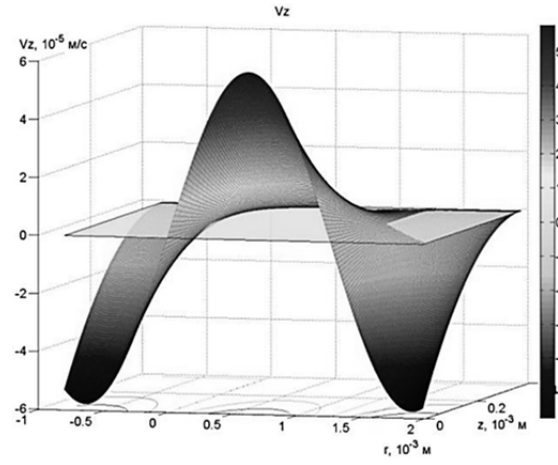


Рис. 4. Осевая составляющая поля скоростей  $V_z$

В нашем случае выражения (13) примут вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial V_z}{\partial z}; \varepsilon_{rr} = \frac{\partial V_r}{\partial r}; \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{V_r}{r}; \\ \varepsilon_{zr} &= \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z}; \varepsilon_{r\theta} = 0; \varepsilon_{\theta z} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Используя уравнения (12) и произведя действия, указанные в соотношениях (14), получим выражения для скоростей деформаций:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{zz} &= - \frac{2AR \sin\left(\frac{\pi r}{St_k}\right) \sin\left(A\left(\frac{t}{t_k}-1\right)\right) \cdot \left(\frac{z}{St_k}-1\right)}{\pi k r t_k}; \\ \varepsilon_{rr} &= \frac{2AR \sin\left(A\left(\frac{t}{t_k}-1\right)\right) \cdot \left(\frac{z}{St_k}-1\right) \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi r}{St_k}\right)-1\right)}{\pi^2 k r^2} + \frac{2AR \sin\left(\frac{\pi r}{St_k}\right) \sin\left(A\left(\frac{t}{t_k}-1\right)\right) \cdot \left(\frac{z}{St_k}-1\right)}{\pi k r t_k}; \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = -\frac{2AR \sin\left(A\left(\frac{t}{t_k}-1\right)\right) \cdot \left(\frac{z}{St_k}-1\right) \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi r}{St_k}\right)-1\right)}{\pi^2 k r^2};$$

$$\varepsilon_{zr} = \frac{ARS \sin\left(\frac{\pi r}{St_k}\right) \sin\left(A\left(\frac{t}{t_k}-1\right)\right) \left(\frac{z}{St_k}-1\right)^2}{\pi r^2} - \frac{AR \cdot \cos\left(\frac{\pi r}{St_k}\right) \sin\left(A\left(\frac{t}{t_k}-1\right)\right) \left(\frac{z}{St_k}-1\right)^2}{r t_k}$$

$$-\frac{2AR \sin\left(A\left(\frac{t}{t_k}-1\right)\right) \left(\cos\left(\frac{\pi r}{St_k}\right)-1\right)}{\pi^2 k^2 r t_k};$$

Для наглядности построим пространственную картину распределения скоростей деформаций при тех же исходных данных, при которых построили поля скоростей.

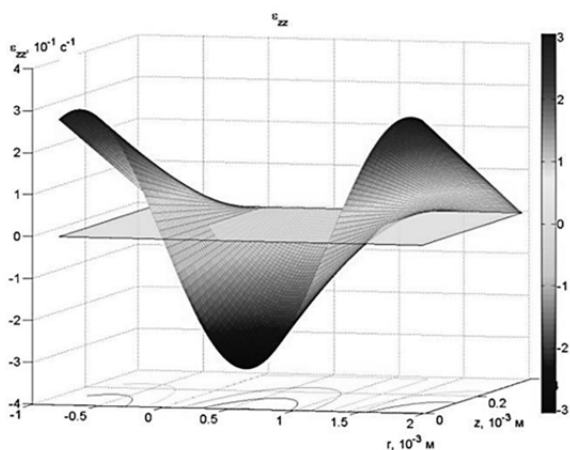


Рис. 5. Осевая составляющая скорости деформаций  $\varepsilon_{zz}$

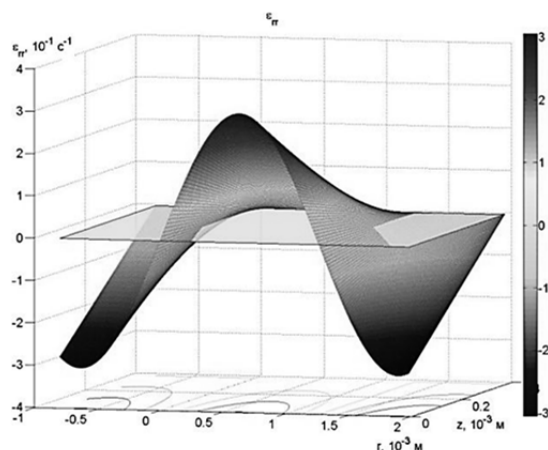


Рис. 6. Радиальная составляющая скорости деформаций  $\varepsilon_{rr}$

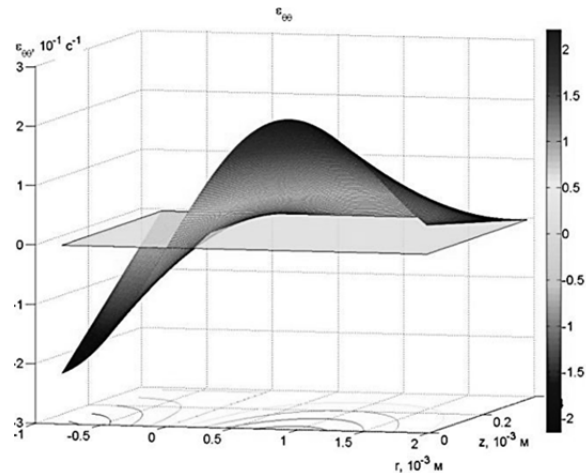


Рис. 7. Окружная составляющая скорости деформаций  $\varepsilon_{\theta\theta}$

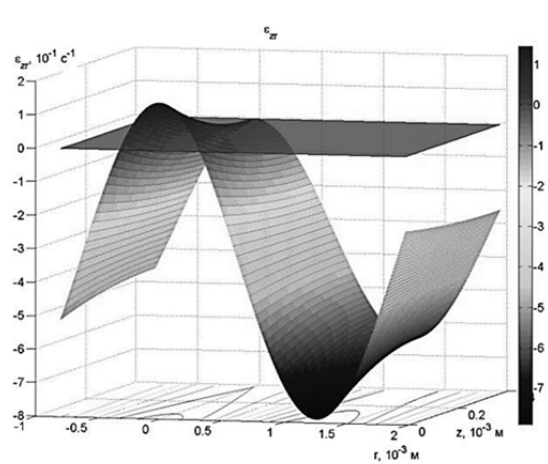


Рис. 8. Сдвиговая составляющая скорости деформаций  $\varepsilon_{zr}$

Построение полей скоростей деформаций позволяет наглядно представить механизм протекания деформаций и упростить анализ деформированного состояния материала.

#### Выводы

Получены зависимости, которые описывают поля скоростей течения частиц металла и скоростей деформаций в материале детали при алмазном выглаживании в любой момент времени. Использование полученных зависимостей позволяет воспроизводить пространственные картины полей скоростей и скоростей деформаций, что показано на конкретном примере. Полученные результаты планируется использовать для дальнейшего исследования процесса алмазного выглаживания при определении таких важных энергосиловых характеристик как мощность и работа пластической деформации, а также температуры в зоне контакта алмазного индентора и детали.

**Анотація.** Подано аналіз результатів досліджень процесів поверхневого пластичного деформування, який дозволив зробити висновок про перспективність методу алмазного вигладжування. Показано, що основною перешкодою для підвищення ефективності алмазного вигладжування, є прямо пропорційна залежність температури в зоні контакту від швидкості обробки. Встановлено, що вивчення впливу параметрів режиму обробки на енергосилові характеристики процесу і стійкість інструменту є важливим завданням. Рішення поставленої задачі дозволить вести ефективне управління процесом алмазного вигладжування.

**Ключові слова:** пластичне деформування, зміцнення, алмазне вигладжування, фінішна обробка, способи зміцнення, ефективність процесу.

**Abstract. Purpose.** Definition of the components of the deformation rates to material items in diamond burnishing.

**Methodology approach.** Theoretical researches of the deformed state of material of detail were produced on the basis of close system of equalizations of mechanics of continuous environments. It is shown that for a continuous environment work of deformation will be determined through the function of dissipation of energy that is determined by intensity of speeds of deformations. In this connection, the detailed research of the deformed state of material of purveyance is required in the zone of treatment with the purpose of determination of making speeds of deformations. The chart of co-operation of diamond tip is considered with the processed surface. The law of change of speed of particles of material is certain. For the analysis of the deformed state of material of detail in the process of pressing used general equalizations of mechanics of continuous environments and field of speeds of moving. Dependences that describe the fields of speeds of flow of particles of metal and speeds of deformations in material of detail at the diamond pressing at any moment of time are got. For the concrete value of parameters of treatment the spatial pictures of the fields of speeds and speeds of deformations are built. Drawn conclusion concerning further researches.

**Keywords:** plastic deformation, hardening, diamond smoothing, finishing, hardening methods, the process efficiency.

1. Кабатов А.А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием / А.А. Кабатов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2013. – Вып. 58. – С. 49 – 54.
2. Титов А.В. Повышение эффективности выглаживания различных конструкционных материалов за счет управления скоростными и силовыми параметрами нагружения инструмента / А.В. Титов // Вестник НТУ КПИ. Машиностроение. – К.: НТУ КПИ, 2010. – Вып. 59. – С. 121 – 125.
3. Титов В.А. Некоторые перспективные направления развития процессов выглаживания конструкционных материалов / Титов В.А., Титов А.В. // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» - 2009. - № 32. – С. 78-86.
4. Титов А.В. Моделирование процесса алмазного выглаживания с использованием системы ANSYS / А.В. Титов, С.В. Мозговой, А.Я. Качан // Вестник двигателестроения. – З.: ОАО «Мотор Сич», 2006. - № 4. – С. 90 – 96.
5. Мозговой В.Ф. Оценка оптимизированных технологических параметров процесса алмазного выглаживания при изготовлении валов ГТД / Мозговой В.Ф., Качан А.Я., Титов В.А. и др // Технологические системы, 2001. – № 5(11). – С.78-85.
6. Кабатов А.А. Структура исследования энергосиловых параметров процесса алмазного выглаживания / А.А. Кабатов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2013. – Вып. 1(73). – С. 67 – 72.
7. Алексеев Ю.Н. Вопросы пластического течения металлов / Ю.Н. Алексеев. – Х.: Изд-во ХГУ, 1958. – 187 с.
8. Алексеев Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением прокаткой и резанием / Ю.Н. Алексеев. – Х.: Изд-во ХГУ, 1969. – 107 с.
9. Алексеев Ю.Н. Теоретическое исследование деформированного состояния при вдавлении сферического индентора в полупространство / Ю.Н. Алексеев, В.К. Борисевич, П.И. Коваленко // Импульсная обработка металлов давлением. – Х.: Изд-во ХАИ, 1975. – Вып. 5 – С. 112-116.

## REFERENCES

1. Kabatov A.A. Analiz finishnyh metodov obrabotki poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem. A.A. Kabatov. Otkrytye informacionnye i kompjuternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr. H. : Nac. azerokosm. un-t "HAI", 2013. Vyp. 58. P. 49 – 54.
2. Titov A.V. Povyshenie jeffektivnosti vyglazhivaniya razlichnyh konstrukcionnyh materialov za schet upravlenija skorostnymi i silovymi parametrami nagruzenija instrumenta. A.V. Titov. Vestnik NTU KPI. Mashinostroenie. Kyiv.: NTU KPI, 2010. Vyp. 59. P. 121 – 125.
3. Titov V.A. Nekotorye perspektivnye napravlenija razvitija processov vyglazhivaniya konstrukcionnyh materialov. Titov V.A., Titov A.V. Visnik nacionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac. Tematichnij vipusk: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah. Harkiv: NTU «HPI» 2009. No 32. P. 78-86.
4. Titov A.V. Modelirovanie processa almaznogo vyglazhivaniya s ispolzovaniem sistemy ANSYS. A.V. Titov, S.V. Mozgovej, A.Ja. Kachan. Vestnik dvigatelestroeniya. Z.: OAO «Motor Sich», 2006. No 4. P. 90 – 96.
5. Mozgovej V.F. Ocenka optimizirovannyh tehnologicheskijh parametrov processa almaznogo vyglazhivaniya pri izgotovlenii valov GTD. Mozgovej V.F., Kachan A.Ja., Titov V.A. i dr. Tehnologicheskie sistemy, 2001. No 5(11). P. 78-85.
6. Kabatov A.A. Struktura issledovanija jenergosilovyh parametrov processa almaznogo vyglazhivaniya. A.A. Kabatov. Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov: sb. nauch. tr. H.: Nac. azerokosm. un-t "HAI", 2013. Vyp. 1(73). P. 67 – 72.
7. Alekseev Ju.N. Voprosy plasticheskogo techenija metallov. Ju.N. Alekseev. H.: Izd-vo HGU, 1958. – 187 p.
8. Alekseev Ju.N. Vvedenie v teoriju obrabotki metallov davleniem prokatkoj i rezaniem. Ju.N. Alekseev. H.: Izd-vo HGU, 1969. – 107 p.
9. Alekseev Ju.N. Teoreticheskoe issledovanie deformirovannogo sostojanija pri vdavlivanii sfericheskogo indentora v poluprostranstvo. Ju.N. Alekseev, V.K. Borisevich, P.I. Kovalenko. Impulsnaja obrabotka metallov davleniem. H.: Izd-vo HAI, 1975. Vyp. 5. P. 112-116.