

УДК 621.787.4

А.И. ДОЛМАТОВ<sup>1</sup>, А.А. КАБАТОВ<sup>2</sup>, М.А. КУРИН<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина*<sup>2</sup> *Государственное предприятие Харьковский машиностроительный завод «ФЭД», Украина*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ

*Сформулирована проблема в необходимости исследования энергосиловых характеристик процесса алмазного выглаживания. Получены выражения, которые позволяют воспроизводить пространственную картину распределения деформаций в металле при алмазном выглаживании, что позволяет наглядно представить механизм протекания деформаций и упростить анализ деформированного состояния материала. Установлена функциональная связь между мощностью деформирования и параметрами режима обработки при алмазном выглаживании. Результаты исследования могут быть полезны при определении такой важной характеристики процесса как температура в зоне контакта алмазного индентора и детали.*

**Ключевые слова:** алмазное выглаживание, пластическая деформация, диссипация энергии, скорость деформаций, интенсивность напряжений, мощность пластической деформации.

### Введение

Развитие современных технологий в авиационной промышленности происходит в условиях повышения требований к безопасности полетов, а также надежности и ресурсу наиболее ответственных деталей газотурбинного двигателя. Общеизвестно, что качество изделий, эксплуатационные характеристики деталей и их надежность в значительной степени зависят от технологии их изготовления. В основном это относится к финишным методам обработки, которые оказывают решающее влияние на характеристики поверхностного слоя деталей [1, 2]. Одним из методов отделочной обработки, который обеспечивает значительное улучшение эксплуатационных характеристик деталей, является алмазное выглаживание.

Проведенный в работе [3] анализ процессов поверхностного пластического деформирования позволил сделать вывод о перспективности метода алмазного выглаживания. Поэтому работы, посвященные изучению процесса алмазного выглаживания, являются актуальными и заслуживают внимания.

### 1. Формулирование проблемы

Основным препятствием для повышения эффективности алмазного выглаживания является прямо пропорциональная зависимость температуры в зоне контакта от скорости.

Общеизвестно, что основным источником теплообразования при различных процессах механической обработки является работа пластической деформации. Для сплошной среды работа деформирования будет определяться через функцию диссипации энергии, которая определяется интенсивностью скоростей деформаций.

В работе [4] 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 [5,6], которые позволяют производить детальное исследование состояния деформируемого металла в зоне обработки.

Таким образом, изучение влияния параметров режима обработки на энергосиловые характеристики процесса является важной задачей и требует исследования.

### 2. Обзор результатов предыдущих исследований

Теоретическое исследование деформированного состояния материала детали при алмазном выглаживании проводилось нами в цилиндрической системе координат в предположении условий пла-

стического контакта жесткого сферического индентора и деформируемого полупространства с использованием результатов, полученных ранее другими исследователями и представленными в работе [7].

Условная схема взаимодействия алмазного наконечника с поверхностью детали представлена на рис. 1.

Использование структурно-логической схемы, представленной в работе [4] для анализа деформированного состояния материала детали в процессе выглаживания, позволило нам на основании общих уравнений механики сплошных сред получить поле скоростей течения металла в зоне деформирования:

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

$$V_r = \frac{2ARS}{\pi^2 k r} \sin\left(A\left(\frac{t}{t_k} - 1\right)\right) \left(\frac{z}{Skt_k} - 1\right) \left(1 - \cos \frac{\pi r}{St_k}\right); \quad (1)$$

$$V_\theta = 0,$$

где  $R$  – радиус индентора;  $t$  – текущее время;  $t_k$  – время деформирования участка обрабатываемой поверхности;  $A = \arctg\left(\frac{\sqrt{2RH - H^2}}{R - H}\right)$ ;  $H$  – глубина на-

клепа;  $S$  – скорость продольной подачи;  $r, z$  – координаты точки в цилиндрической системе координат;  $k$  – коэффициент пропорциональности.

На основании уравнений (1) нами получены выражения для скоростей деформаций:

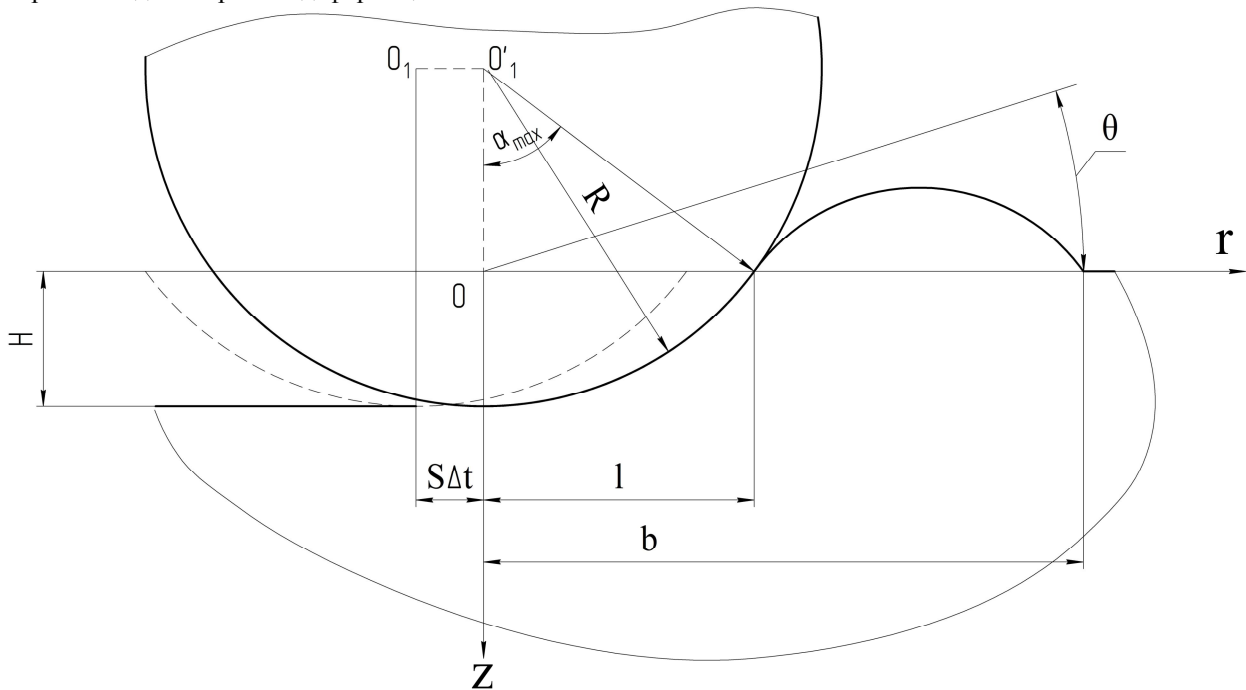


Рис. 1. Схема взаимодействия алмазного наконечника с поверхностью детали

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

$$\varepsilon_{r\theta} = 0; \quad \varepsilon_{\theta z} = 0.$$

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

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

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

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

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

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

Представленные зависимости 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.

Полученные результаты позволяют нам проводить дальнейшее исследование процесса алмазного выглаживания и являются ключевыми при определении таких важных энергосиловых характеристик как мощность и работа пластической деформации, а также температуры в зоне контакта алмазного индентора и детали.

### 3. Определение мощности пластической деформации

Для определения мощности деформации функцию диссипации энергии необходимо проинтегрировать по объему [4]:

$$N = \iiint_{(V)} E dV. \quad (2)$$

Функцию диссипации энергии можно выразить через интенсивности напряжений и деформаций по формуле:

$$E = \sigma_i \cdot \varepsilon_i, \quad (3)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\varepsilon_i$  – интенсивность скоростей деформаций.

Интенсивность напряжений для различных деформируемых сред является сложной функцией от интенсивности деформаций, интенсивности скоростей деформаций, температуры, времени и других параметров [6].

Металлы и сплавы представляют группу материалов, упрочняющихся в процессе пластической деформации. В работе [6] Ю.Н. Алексеевым предложена простая функциональная зависимость, где интенсивность напряжений является функцией только интенсивности деформации:

$$\sigma_i = \sigma_T \cdot \varepsilon_i^n, \quad (4)$$

где  $n$  – показатель деформационного упрочнения;

$\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций;  $\sigma_T$  – предел текучести.

Действительно, согласно данным работы [8] среди восьми различных видов кривых упрочнения, построенных по результатам испытаний материала на сжатие, наиболее распространенной является кривая, которая хорошо аппроксимируется зависимостью вида:

$$\sigma_s = \sigma_T \cdot \varepsilon_i^n,$$

где  $\sigma_s$  – напряжение течение металла при сжатии.

Такого вида зависимостью хорошо аппроксимируются кривые упрочнения термически обработанных, углеродистых, легированных конструкционных и инструментальных сталей, большинство высоколегированных сталей, алюминиевых и титановых сплавов, а также других материалов.

Таким образом, после подстановки выражений (3) и (4) в (2), окончательно получим:

$$N = \iiint_{(V)} \sigma_T \varepsilon_i^n dV. \quad (5)$$

В связи с этим нам необходимо найти выражения для определения интенсивности деформаций и скоростей деформаций.

Интенсивность скоростей деформаций в нашем случае можно найти по формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + (\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz})^2 + \frac{3}{2} \cdot \varepsilon_{zr}^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Составляющие деформаций выражаются через составляющие скоростей деформаций:

$$\begin{aligned} e_{zz} &= \int_{t1}^{t2} \varepsilon_{zz} dt & e_{rr} &= \int_{t1}^{t2} \varepsilon_{rr} dt & e_{\theta\theta} &= \int_{t1}^{t2} \varepsilon_{\theta\theta} dt; \\ e_{zr} &= \int_{t1}^{t2} \varepsilon_{zr} dt & e_{r\theta} &= 0 & e_{\theta z} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Для оценки адекватности модельных представлений нагляднее производить анализ полученных зависимостей, представленных графически, при конкретных значениях параметров режима обработки. Построим график зависимости интенсивности скоростей деформаций  $\varepsilon_i$  от координат при следующих значениях параметров:  $z=0$  мм;  $R=2$  мм;  $H=0,45$  мм;  $S=0,05$  мм/об;  $n=380$  об/мин;  $k=0,3$  (рис.2). Область деформации изменяется в пространстве и во времени, а время начала и конца деформации для каждой точки пространственной области зоны обработки соответственно  $t1 = 0$ ,  $t2 = tk$ .

В результате интегрирования скоростей деформаций по времени (при выше указанных значениях пределов интегрирования), согласно выражениям (7), получаем следующие выражения для составляющих деформаций:

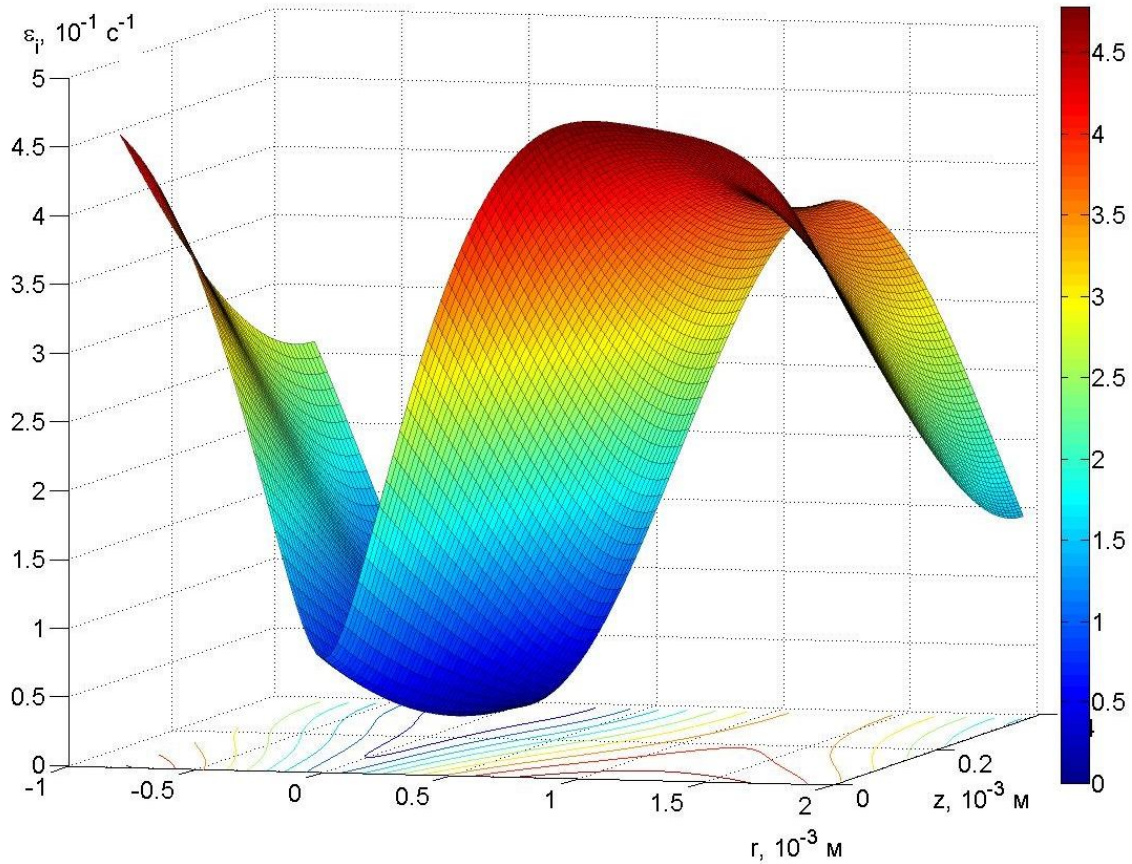


Рис. 2. Интенсивность скоростей деформаций  $\epsilon_i$

$$e_{zz} = \frac{4Rz \sin\left(\frac{\pi r}{St_k}\right) \sin\left(\frac{A}{2}\right)^2}{\pi S k^2 r t_k} - \frac{4R S k t_k \sin\left(\frac{\pi r}{St_k}\right) \sin\left(\frac{A}{2}\right)^2}{\pi S k^2 r t_k};$$

$$e_{zr} = \frac{4R \cdot \left(\frac{\cos(A)}{2} - \frac{1}{2}\right)}{\pi^2 k^2 r} - \frac{2R \cos\left(\frac{\pi r}{St_k}\right) (\cos(A) - 1)}{\pi^2 k^2 r} - \frac{R \cdot \cos\left(\frac{\pi r}{St_k}\right) \cdot (z - S k t_k)^2 (\cos(A) - 1)}{S^2 k^2 r t_k^2} + \frac{R \sin\left(\frac{\pi r}{St_k}\right) \cdot (z - S k t_k)^2 \cdot (\cos(A) - 1)}{\pi S k^2 r^2 t_k};$$

$$e_{\theta\theta} = -\frac{2R \cdot (z - S k t_k) \cdot (\cos(A) - 1)}{\pi^2 k^2 r^2} \left( \cos\left(\frac{\pi r}{St_k}\right) - 1 \right);$$

$$e_{rr} = \frac{4R(z - S k t_k) \left( \cos\left(\frac{A}{2}\right)^2 - 1 \right)}{\pi^2 S k^2 r^2 t_k} \times \left[ 2S t_k \left( \cos\left(\frac{\pi r}{2S t_k}\right)^2 - 1 \right) + \pi r \sin\left(\frac{\pi r}{St_k}\right) \right].$$

Интенсивность деформаций можно определить из выражения, подобного (6):

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} [(e_{zz} - e_{rr})^2 + (e_{rr} - e_{\theta\theta})^2 + (e_{\theta\theta} - e_{zz})^2 + \frac{3}{2} \cdot e_{zr}^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Построим графики зависимости интенсивностей деформаций  $e_i$  и интенсивности напряжений  $\sigma_i$  от координат для материала 12X18H10T со следующими механическими свойствами:  $\sigma_T = 315 \text{ МПа}$ ,  $n = 0,37$  (рис. 3, 4). Значения параметров режима обработки возьмем те же, что и при построении интенсивности скоростей деформаций.

Вычисление интеграла (5) после подстановки в него выражений (6) и (9) будем производить численным методом, так как он не выражается в конечном виде через элементарные функции. Для получения графической зависимости  $N_i = f(z_i, r_i)$  (рис. 5)

воспользуемся классическим определением тройного интеграла [9]. Разобьем пространственную область (V), охватывающую зону деформирования на n частей, где  $\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_n$  – их объемы, при

этом в нашем случае, для цилиндрической системы координат  $\Delta V_i = r_i \Delta r_i \Delta \theta_i \Delta z_i$ .

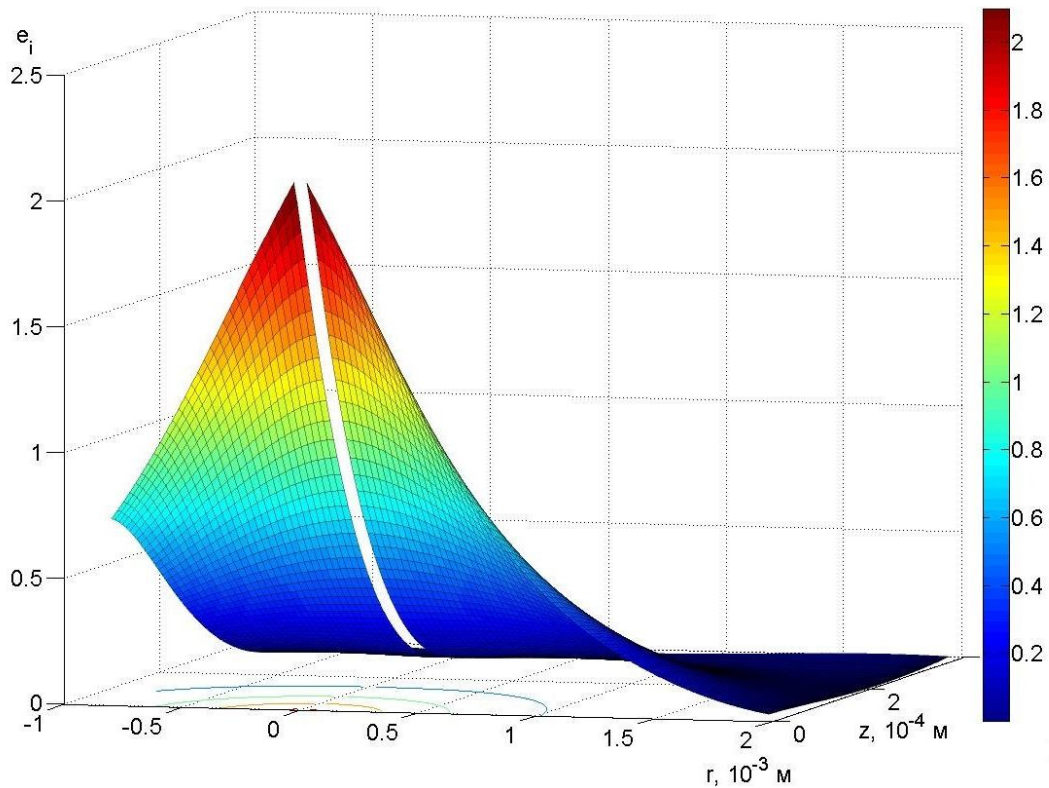


Рис. 3. Интенсивность деформаций  $e_i$

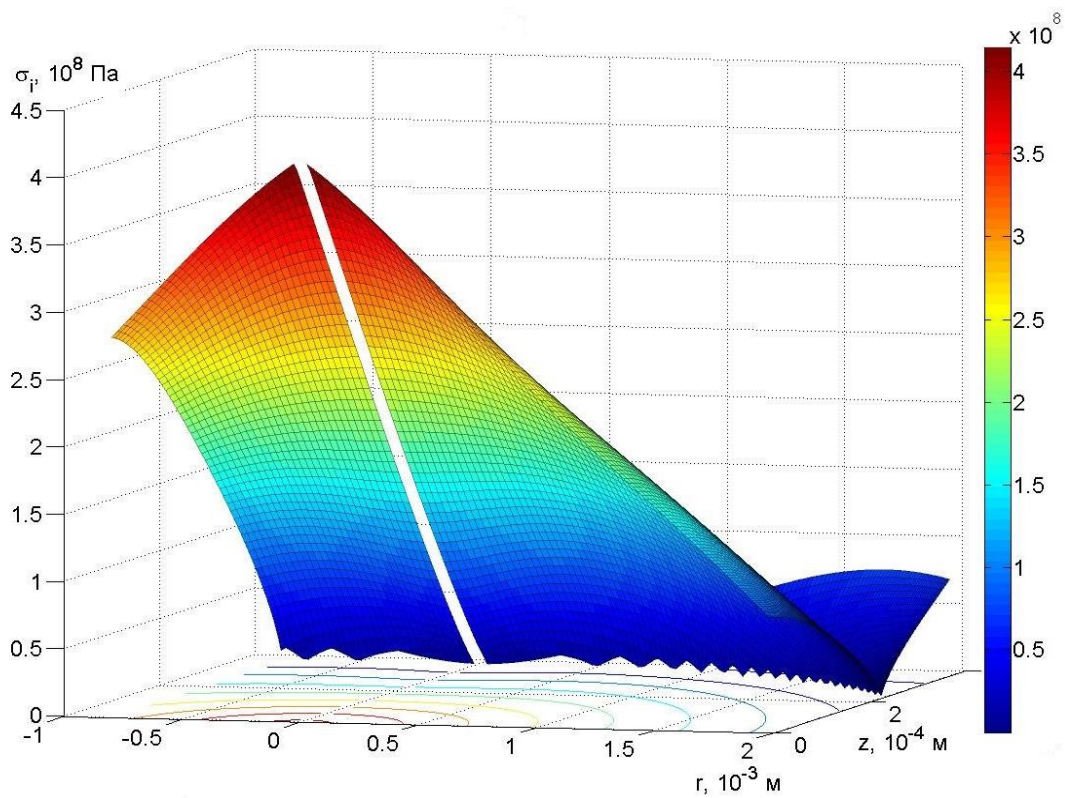
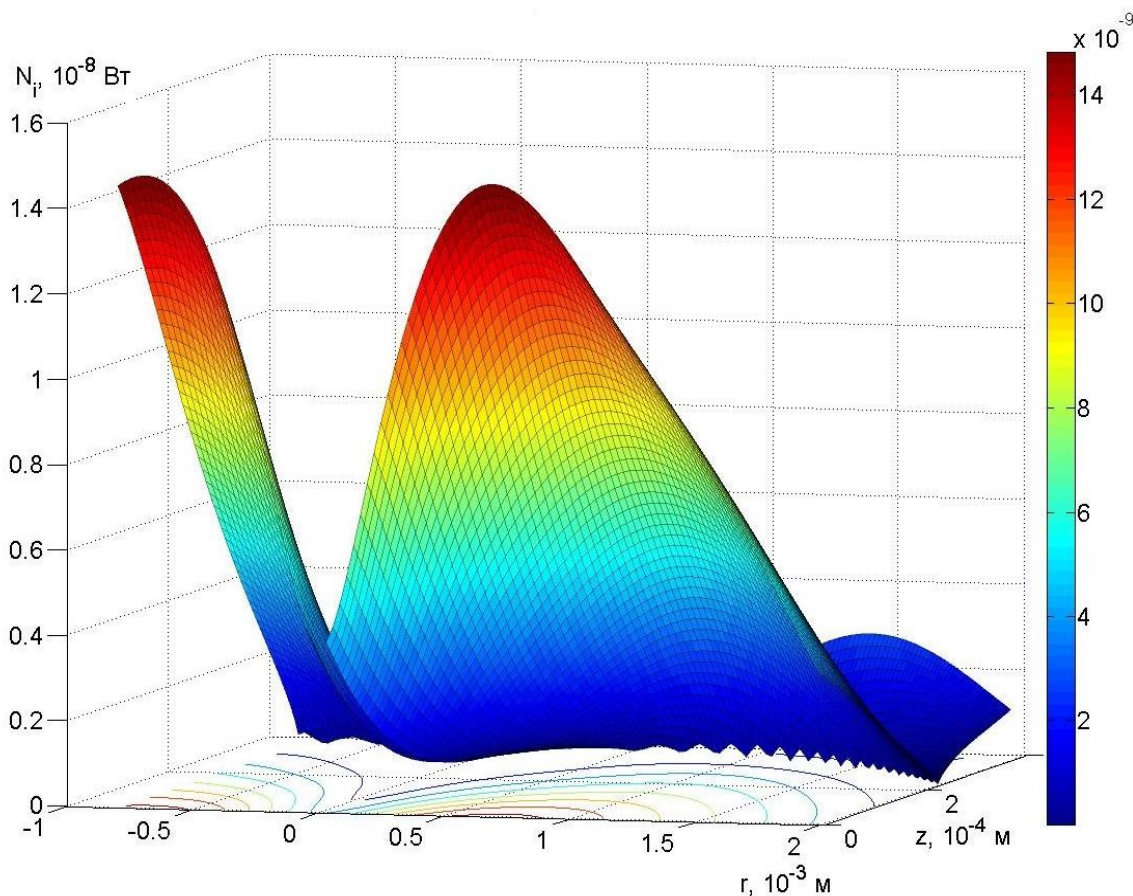


Рис. 4. Интенсивность напряжений  $\sigma_i$

Рис. 5. Изменение мощности деформирования  $N_i$ 

В каждой части возьмем по точке и вычислим функцию:

$$N_i = \sigma_T \epsilon_i^n(r_i, z_i, \theta_i) \epsilon_i(r_i, z_i, \theta_i) \Delta V_i.$$

Составим сумму:

$$S_n = N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n.$$

При этом сам интеграл (5) будет представлять собой предел, к которому стремится  $S_n$ , когда наибольший из диаметров частных областей стремится к нулю.

Вычисление мощности деформирования по выше описанному алгоритму для рассматриваемого нами случая дает следующий результат –  $N \approx 35,21$  Вт.

### Заключение

Получены выражения, которые позволяют воспроизвести пространственную картину распределения деформаций в металле при алмазном выглаживании, что позволяет наглядно представить механизм протекания деформаций и упростить анализ деформированного состояния материала. Установлена функциональная связь между мощностью деформирования и параметрами режима обработки при алмазном выглаживании.

### Литература

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД [Текст] / В.А. Богуслаев., Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк. и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – Часть 1. – 396 с.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД [Текст] / В.А. Богуслаев., Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк. и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – Часть 2. – 420 с.
3. Кабатов, А.А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.А. Кабатов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2013. – Вып. 58. – С. 49 – 54.
4. Кабатов, А.А. Структура исследования энергосиловых параметров процесса алмазного выглаживания [Текст] / 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.
5. Алексеев, Ю.Н. Вопросы пластического течения металлов [Текст] / Ю.Н. Алексеев. – Х.: Изд-во ХГУ, 1958. – 187 с.

6. Алексеев, Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием [Текст] / Ю.Н. Алексеев. – Х.: Изд-во ХГУ, 1969. – 107 с.

7. Алексеев, Ю.Н. Теоретическое исследование деформированного состояния при вдавливании сферического индентора в полупространство [Текст] / Ю.Н. Алексеев, В.К. Борисевич, П.И. Коваленко // Импульсная обработка металлов давлением: сб. науч. тр. – Х.: Изд-во ХАИ, 1975. – Вып. 5. – С. 112-116.

8. ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие [Текст]. – Взамен ГОСТ 25.503-80; введен 21.11.1997. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 25 с.

9. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления [Текст] / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Физматлит, 2003. – 864 с.

*Поступила в редакцию 13.05.2013, рассмотрена на редколлегии 29.05.2013*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., первый заместитель директора В.А. Фадеев, Государственное предприятие «Харьковский машиностроительный завод «ФЭД» Харьков.

### ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ АЛМАЗНОМУ ВИГЛАДЖУВАННІ

*А.І. Долматов, О.О. Кабатов, М.О. Курін*

Сформульовано проблему необхідності дослідження енергосилових характеристик процесу алмазного вигладжування. Отримано вирази, які дозволяють відтворювати просторову картину розподілу деформацій у металі при алмазному вигладжуванні, що дозволяє наочно уявити механізм протікання деформацій і спростити аналіз деформованого стану матеріалу. Встановлено функціональний зв'язок між потужністю деформування і параметрами режиму обробки при алмазному вигладжуванні. Результати дослідження можуть бути корисні при визначенні такої важливої характеристики процесу як температура в зоні контакту алмазного індентора і деталі.

**Ключові слова:** алмазне вигладжування, пластична деформація, дисипація енергії, швидкість деформацій, інтенсивність напружень, потужність пластичної деформації.

### POWER DEFINITION PLASTIC DEFORMATION AT THE DIAMOND SMOOTHING

*A.I. Dolmatov, A.A. Kabatov, M.A. Kurin*

The problem of the need to studying the energy-power characteristics of the process of diamond smoothing has been formulated. The expressions that let you play the spatial pattern of the strain distribution in the metal at the diamond smoothing have been received. This allows visualizing the mechanism of the deformation and simplifying the analysis of the deformed state of the material. The functional relationship between the power of the deformation and the parameters of processing mode at diamond smoothing has been determined. The results can be useful in determining important characteristics such as the process temperature in the contact zone of the diamond indenter with part.

**Keywords:** diamond smoothing, plastic deformation, energy dissipation, strain rate, stress intensity, the power of plastic deformation.

**Долматов Анатолий Иванович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Кабатов Александр Александрович** – начальник технологического бюро цеха № 11 Государственного предприятия Харьковский машиностроительный завод «ФЭД», Харьков, Украина.

**Курин Максим Александрович** – канд. техн. наук, доцент кафедры производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kurin\_83@mail.ru.