

## PHYSICAL AND TECHNICAL BASIS OF EXPERIMENT AND DIAGNOSTICS

PACS numbers: 06.60.Vz, 46.55.+d, 47.10.A-, 81.20.Wk, 81.40.Lm, 81.40.Pq, 83.50.-v

### Анализ процесса пластической деформации металла стружки при несвободном резании

М. А. Курин

*Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського*  
*«Харківський авіаційний інститут»,*  
*ул. Чкалова, 17,*  
*61070 Харків, Україна*

Рассмотрен процесс деформирования стружки при несвободном резании. Представлены разработанные на базе метода гиперболической системы уравнений, описывающие пространственные поля скоростей перемещений частиц при обтекании режущей пластины и абразивного зерна. Изложена последовательность математических операций, позволяющих найти важные физические величины, характеризующие деформированное состояние материала стружки. Проанализировано деформированное состояние срезаемого слоя в двух конкретных случаях — обтекании стружкой режущей пластины и абразивного зерна при протягивании и врезном шлифовании соответственно. Результаты расчёта подтвердили обоснованность представленных модельных представлений.

**Ключевые слова:** несвободное резание, пластическое деформирование, поля скоростей, метод гиперболической системы уравнений, режущая пластина, абразивное зерно.

Розглянуто процес деформування стружки при невольному різанні. Представлено розроблені на базі методу гіпербол системи рівнянь, що описують просторові поля швидкостей переміщень частинок при обтіканні різальної пластини і абразивного зерна. Викладено послідовність математичних операцій, що дозволяють знайти важливі фізичні величини, які

Corresponding author: Maksym Oleksandrovych Kurin  
E-mail: m.kurin@khai.edu

*National Aerospace University 'Kharkiv Aviation Institute'*  
*17 Chkalov Str., UA-61070 Kharkiv, Ukraine*

Citation: M. O. Kurin, Analysis the Process of Plastic Deformation Metal Chip at Non-Free Cutting, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 3: 433–449 (2020) (in Russian), DOI: [10.15407/mfint.42.03.0433](https://doi.org/10.15407/mfint.42.03.0433).

характеризують деформований стан матеріалу стружки. Проаналізовано деформований стан зрізаного шару у двох конкретних випадках — обтікання стружкою різальної пластини і абразивного зерна при протягуванні й врізному личкуванні відповідно. Результати розрахунку підтвердили обґрунтованість представлених модельних уявлень.

**Ключові слова:** невільне різання, пластичне деформування, поля швидкостей, метод гіпербол, різальна пластина, абразивне зерно.

The process of chip deformation during non-free cutting is considered. The systems of equations developed on the base of the hyperbola method are presented. They describe the spatial fields of the velocities of particle displacements around both the cutter and the abrasive grain. The order of mathematical operations is expounded that allow to finding important physical quantities characterizing the deformed state of the chip material. The deformed state of the cut layer in two specific cases is analysed—the flow around the cutting plate and the abrasive grain during broaching and plunge grinding, respectively. The calculation results confirmed the validity of the given model representations.

**Key words:** non-free cutting, plastic deformation, velocity fields, hyperbola method, cutter, abrasive grain.

*(Получено 16 апреля 2019 г.; окончат. вариант — 17 января 2020 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении наибольшее распространение получили технологические схемы обработки, характеризующиеся сложной геометрией контакта режущей кромки с обрабатываемым материалом. При реализации такого осложненного процесса резания, получившего название несвободного, стружка формируется в результате съёма металла несколькими режущими кромками или одной фасонной, образующей профиль поверхности одновременно всеми точками. Ключевым вопросом механики такого резания, отличающегося широким спектром схем реализации, является исследование процесса деформирования снимаемого слоя, который невозможно решить без наличия полноценной картины течения металла в зоне деформирования. Стоит подчеркнуть, что изучение несвободного резания особенно актуально в рамках современного производства в целях совершенствования высокопроизводительных методов обработки, предполагающих использование высоких скоростей резания и инструмента различных форм.

## 2. АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ РЕЗУЛЬТАТОВ. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В работе [1] представлен разработанный нами метод гипербол, ко-

торый даёт возможность получить основные уравнения полей скоростей течения частиц при обтекании клиновидных тел. Показана несостоятельность использования гармонических векторных полей в области приложения, охватывающей пластическое деформирование металла.

Обобщив все изложенные в работе [1] рассуждения, в механике деформируемого тела можно сформулировать следующий постулат: поле скоростей перемещений частиц при пластическом течении металла с учётом его несжимаемости в рассматриваемой области должно быть соленоидальным или вихревым, что математически можно выразить так:

$$\begin{aligned}\operatorname{div} \mathbf{V} &= 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{V} &\neq 0.\end{aligned}\tag{1}$$

Полученное нами поле скоростей в работе [1] удовлетворяет этому требованию, но пригодно лишь для описания пластического течения при свободном резании, что не охватывает весь спектр методов обработки с широким многообразием их внешних форм и видов.

### 3. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Прежде чем перейти к описанию кинематики при несвободном резании, следует детально рассмотреть процесс деформации срезаемого слоя металла, а именно процесс образования стружки. Из всего многообразия комплекса термомеханических процессов, рассматриваемых в теории стружкообразования, нас интересует исключительно деформация стружки. Известно, что размеры стружки отличаются от размеров срезаемого слоя, а степень этого изменения характеризуется тремя коэффициентами изменения формы стружки, главный из которых — изменение длины получил название коэффициента усадки стружки. Подобные коэффициенты для оценки степени деформации срезаемого слоя применяются на практике достаточно часто в силу простоты и доступности данного метода. В настоящее время для схематизации зоны деформирования при резании достаточно успешно используются упрощённые плоские схемы деформации металла, отличающиеся лишь размерами и границами зон стружкообразования, что позволяет проводить достаточно точный анализ, не выходя за рамки корректных представлений механики твёрдого тела. Основным допущением подобных схематизаций является предположение о плоской деформации и пренебрежение изменением ширины стружки по отношению к ширине среза.

Действительно, согласно данным большинства исследователей усадка стружки составляет 5–15% от ширины срезаемого слоя,

вместе с тем утолщение и укорочение оценивается в 200–600% и более [2, 3]. В работе [3] автор, опираясь на анализ результатов многочисленных экспериментальных исследований, акцентирует внимание на том, что при свободном резании ширина стружки увеличивается незначительно по сравнению с шириной срезаемого слоя, в то же самое время при несвободном резании уширение стружки ещё меньше. Это считается большинством исследователей достаточным основанием, чтобы рассматривать деформированное состояние зоны стружкообразования плоским, а срезаемый слой — подверженным сдвиговой деформации.

В рассматриваемом нами случае несвободного резания при построении полей скоростей перемещения частиц стружки, представленные выше рассуждения дают нам право пренебрегать перемещением частиц металла вдоль ширины режущего элемента, что в принятой ранее системе координат (рис. 1) можно выразить как равенство нулю одной из составляющих трёхмерного векторного поля, а именно  $V_z(x, y, z) = 0$ .

Вместе с этим для построения поля, описывающего пластическое течение металла, наиболее близкое к реальному, на наш взгляд, следует учитывать геометрию кромки и огибание её деформируемым металлом по причине формирования в этих зонах наибольших пластических деформаций и напряжений, предшествующих отделению срезаемого слоя от основного металла. Такие зоны огибания металлом режущего элемента возникают при лезвийной обработке с положительными передними углами и при абразивной — с отрицательными. В связи с этим следует выделить и отдельно рассмотреть два характерных и принципиально отличающихся случая обтека-

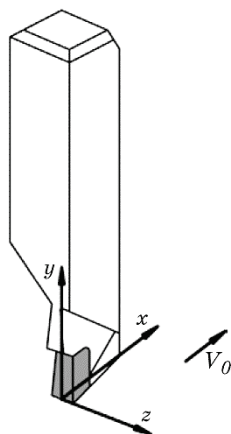


Рис. 1. Резец, система координат и направление скорости резания.

Fig. 1. Cutter, coordinate system and cutting speed direction.

ния режущего элемента — при лезвийной и абразивной обработках. Вполне очевидно, что общий вид уравнений траекторий частиц металла в этих двух случаях будет разный. Действительно, если процесс съёма припуска производится геометрически определёнными лезвиями призматической формы, то линии тока, образуемые снимаемой стружкой, будут отличны от подобных линий, формируемых при удалении материала статистически неопределёнными режущими элементами абразивного инструмента. Ниже нами будут рассмотрены и проанализированы оба этих случая.

#### 4. ОБТЕКАНИЕ РЕЖУЩЕЙ ПЛАСТИНЫ

Любую режущую кромку можно разбить на составляющие прямые участки, зная поля скоростей перемещения металла, по которым с использованием принципа суперпозиции довольно легко получить интегральную картину обтекания стружкой лезвия инструмента. Из всего многообразия методов и схем лезвийной обработки в наиболее сложных условиях находится инструмент, обрабатывающий закрытые поверхности, окружённые с трёх сторон металлом, такие как отверстия, канавки, пазы и т.д. По этой причине среди инструмента наибольшим нагрузкам подвержены сверла, отрезные и канавочные резцы, некоторые виды фрез. Подробный анализ кинематики течения стружки при такой схеме обработки наиболее подробно и точно охарактеризует несвободное резание.

Рассмотрим движение режущей пластины в сплошном материале, поместив её в систему координат  $XYZ$  (рис. 1). Такая схема резания реализуется, например, при точении канавок, отрезании заготовок или на операции протягивания пазов. Уравнения поверхности, описывающей течение деформируемого металла, могут быть получены на базе разработанного нами ранее метода гипербола [1]. В принятой системе координат параметрические уравнения траекторий движения частиц при обтекании пластины примут следующий вид:

$$\begin{aligned} x(\xi, \varphi) &= a \operatorname{sh} \xi \cos \alpha + a \sqrt{e^2 - 1} \operatorname{ch} \xi \sin \alpha + x_1 \cos(\pi/2 + \varphi), \\ y(\xi, \varphi) &= [-a \operatorname{sh} \xi \sin \alpha + a \sqrt{e^2 - 1} \operatorname{ch} \xi \cos \alpha] \cos \varphi, \\ z(\xi, \varphi) &= B \sin \varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\xi$  — параметр, представляющий собой удвоенную площадь криволинейного треугольника,  $\varphi$  — параметр поверхности вращения, угол, задающий текущее положение аппликаты,  $a$  — параметр гипербола, большая полуось,  $e$  — эксцентриситет гипербола,  $\alpha$  — угол поворота ( $\alpha = -\gamma/2$ ,  $\gamma$  — угол резания),  $x_1$  — параметр, определяющий угол (угол в плане) наклона пластины,  $B$  — полуширина

лезвия пластины.

Заменив в системе уравнений (2) параметр  $\zeta$  на  $\omega t + C$ , где  $\omega$ ,  $C$  — некие константы, а  $t$  — время, и продифференцировав полученную систему уравнений по времени, получим составляющие скорости движения:

$$\begin{aligned} V_x(t) &= a\omega \operatorname{ch}(\omega t + C) \cos \alpha + a\sqrt{e^2 - 1} \omega \operatorname{sh}(\omega t + C) \sin \alpha, \\ V_y(t) &= -[a\omega \operatorname{ch}(\omega t + C) \sin \alpha - a\sqrt{e^2 - 1} \omega \operatorname{sh}(\omega t + C) \cos \alpha] \cos \varphi, \\ V_z(t) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

От задания кинематики точки в лагранжевых координатах (2) и (3) перейдём к эйлеровым координатам, опустив промежуточные выкладки и используя последовательность действий, описанных в работе [1], представим поле скоростей в виде произведения функций:

$$\begin{aligned} V_x(x, y, z) &= V_0 [\omega(x, y, z)(e^2 - 1)]^{-1/2} \times \\ &\times \left[ \frac{e^2 \cos \alpha \sin \alpha (x + x_1 z/B)}{B} + \frac{yB(1 - e^2 \sin^2 a)}{\sqrt{B^2 - z^2}} \right], \\ V_y(x, y, z) &= -V_0 [\omega(x, y, z)(e^2 - 1)]^{-1/2} \times \\ &\times \left[ (1 - e^2 \cos^2 \alpha)(x + x_1 z/B)\sqrt{1 - z^2/B^2} + ye^2 \cos a \sin a \right], \\ \omega(x, y, z) &= (x_0 + x_1 z/B)^2 (z/B)^2 + a^2(x, y, z) [1 - e^2 \sin^2 \alpha (z/B)^2] + \\ &+ e^2 \zeta^2(x, y, z)(1 - z^2/B^2), \\ \zeta(x, y, z) &= (1 - e^2 \sin^2 \alpha)^{-1} [(x_0 + x_1 z/B) \cos a + \\ &+ \sqrt{\sin^2 \alpha (1 - e^2) (a^2(x, y, z)(e^2 \sin^2 \alpha - 1) - (x_0 + x_1 z/B)^2)}], \\ a(x, y, z) &= [(B^2 - z^2)(1 - e^2)]^{-1} [-(x + x_1 z/B)^2 (B^2 - z^2) - y^2 B^2 + \\ &+ e^2 (\sqrt{B^2 - z^2} \cos a (x + x_1 z/B) - yB \sin a)^2]^{1/2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $V_0$  — скорость резания,  $x_0$  — координата, определяющая начало пластического течения.

## 5. ОБТЕКАНИЕ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА

Для получения аналитических зависимостей, позволяющих выполнить расчёт функциональных характеристик процесса шлифования, необходимо иметь полноценную картину пластического течения материала при обтекании абразивного зерна. Форма абразив-

ных зёрен отличается большим разнообразием, а сами зёрна в общем случае характеризуются как осколки неправильной формы со случайной поверхностью. При создании моделей исследователи, как правило, представляют случайную поверхность абразивного зерна в виде простых, идеальных форм (конуса, пирамиды, шара, эллипсоида, призмы и т.п.) или их комбинаций. На основании проведённого анализа существующих моделей геометрической формы абразивных зёрен нами предложена концептуальная модель абразивного зерна [4], суть которой заключается в том, что единичное абразивное зерно представляет собой эквивалент, отражающий все режущие свойства круга, при этом само зерно предлагается описывать эллипсоидом вращения. Параметрические уравнения поверхности, описывающие течение металла при обтекании эллипсоида, будут отличны от системы (2), потому как эллипсоид представляет собой тело вращения:

$$\begin{aligned} x(\xi, \varphi) &= [a \operatorname{sh} \xi \cos \alpha + a\sqrt{e^2 - 1} \operatorname{ch} \xi \sin \alpha] \sin \varphi, \\ y(\xi, \varphi) &= -a \operatorname{sh} \xi \sin \alpha + a\sqrt{e^2 - 1} \operatorname{ch} \xi \cos \alpha, \\ z(\xi, \varphi) &= B \cos \varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $B$  — полуширина реза зерна.

Выполнив преобразования системы (5), аналогичные описанным выше для системы (2), после математических операций получим систему уравнений, описывающих скорость движения частицы металла:

$$\begin{aligned} V_x(t) &= [a\omega \operatorname{ch}(\omega t + C) \cos \alpha + a\sqrt{e^2 - 1} \omega \operatorname{sh}(\omega t + C) \sin \alpha] \sin \varphi, \\ V_y(t) &= -a\omega \operatorname{ch}(\omega t + C) \sin \alpha + a\sqrt{e^2 - 1} \omega \operatorname{sh}(\omega t + C) \cos \alpha, \\ V_z(t) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

В координатах Эйлера система (6) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} V_x(x, y, z) &= V_0 [\omega(x, y, z)(e^2 - 1)]^{-1/2} [(x \sin \alpha + y \cos \alpha \sqrt{1 - z^2/B^2}) \times \\ &\quad \times \cos \alpha + (e^2 - 1) \sin \alpha (x \cos \alpha - y \sin \alpha \sqrt{1 - z^2/B^2})], \\ V_y(x, y, z) &= -V_0 [\omega(x, y, z)(e^2 - 1)(1 - z^2/B^2)]^{-1/2} [(x \sin \alpha + \\ &\quad + y \sqrt{1 - z^2/B^2} \cos \alpha) \sin \alpha - (e^2 - 1) \cos \alpha \times \\ &\quad \times (x \cos \alpha - y \sin \alpha \sqrt{1 - z^2/B^2})], \\ \omega(x, y, z) &= a^2(x, y, z) [1 - (1 - e^2 \sin^2 \alpha)(z/B)^2] - \\ &\quad - x_0 z^2 (B^2 - z^2)^{-1} + e^2 \zeta^2(x, y, z), \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\zeta(x, y, z) = (1 - e^2 \sin^2 \alpha)^{-1} \left\{ x_0 (1 - z^2/B^2)^{-1} \cos a + \left[ \sin^2 \alpha \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (1 - e^2) \left( a^2(x, y, z) (e^2 \sin^2 \alpha - 1) - x_0 (1 - z^2/B^2)^{-1} \right) \right]^{1/2} \right\}, \quad (7б)$$

$$a(x, y, z) = \left[ (e^2 - 1)(1 - z^2/B^2) \right]^{-1/2} \left\{ x^2 + y^2 (1 - z^2/B^2) - \right. \\ \left. - e^2 [x \cos a - y \sin \alpha (1 - z^2/B^2)^{1/2}]^2 \right\}^{1/2}.$$

## 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

Полученные нами выше системы уравнений (4), (7а) и (7б) удовлетворяют условию (1), в чём достаточно легко убедиться, проведя соответствующие вычисления. Но, в силу громоздкости получаемых выражений, здесь и далее не будем приводить промежуточные аналитические выражения для рассмотренных нами случаев, а лишь изложим последовательность математических операций, позволяющих определить важные физические величины, характеризующие деформированное состояние материала стружки.

На основании поля скоростей перемещений легко вычислить составляющие скоростей деформаций, используя зависимости [1, 5]

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial V_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial V_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z}, \\ \varepsilon_{xy} = \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zx} = \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z}. \quad (8)$$

Далее определяем составляющие деформации

$$e_{xx} = \int \varepsilon_{xx} dt, \quad e_{yy} = \int \varepsilon_{yy} dt, \quad e_{zz} = \int \varepsilon_{zz} dt, \\ e_{xy} = \int \varepsilon_{xy} dt, \quad e_{yz} = \int \varepsilon_{yz} dt, \quad e_{zx} = \int \varepsilon_{zx} dt. \quad (9)$$

Комплексы формул (8) и (9) позволяют вычислить интенсивность скоростей деформаций и интенсивность деформаций

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)}, \\ e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{yy} - e_{zz})^2 + (e_{zz} - e_{xx})^2 + \frac{3}{2}(e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{zx}^2)}. \quad (10)$$



Как известно, трёхмерное моделирование динамики дислокаций даёт новое понимание целому ряду явлений в деформировании материалов и позволяет установить связи между эволюцией дислокационной структуры, а также свойствами и характеристиками металлов и сплавов. Следует отметить, что такого рода моделирование значительно уточняет физику поведения материалов в инженерных системах при деформировании и позволяет решать наиболее сложные проблемы пластичности [6]. В связи с вышеизложенным, практический интерес представляет исследование изменения плотности дислокаций в процессе деформирования.

Плотность дислокаций в снимаемой стружке определяем через интенсивность деформаций [7]:

$$\rho(x, y, z) = \left[ \frac{2\pi}{Gb} \sigma_{0,2/T} (m e_i^n - 1) \right]^2, \quad (11)$$

где  $G$  — модуль сдвига, Па,  $b$  — модуль вектора Бюргерса, м,  $n$  — показатель деформационного упрочнения,  $m$  — коэффициент, учитывающий изменение предела текучести материала ( $m\sigma_T$  — напряжение течения при логарифмической деформации  $e_i = 1$ ),  $\sigma_T$  — предел текучести материала, Па.

Следует иметь в виду, что формула (11) справедлива для развитых пластических деформаций в упрочняемом материале ( $e_i > 1$  и  $n > 0$ ). Значение показателя деформационного упрочнения  $n$  получено по результатам механических испытаний на сжатие [8].

Проведём исследование состояния деформируемого материала стружки для конкретных случаев обработки. При построении картины изменения плотности дислокаций для упрощения расчётов, а также более удобной оценки и сравнения результатов моделирования, примем допущение, что напряжение течения не зависит от интенсивности деформаций. Это позволит заменить  $m\sigma_T$  на  $\sigma_T$  в формуле (11) и принять  $m = 1$ . Обтекание режущей пластины рассмотрим на примере протягивания паза в детали из сплава ХН77ТЮР ( $G = 8,14 \cdot 10^{10}$  Па,  $b = 3,524 \cdot 10^{-10}$  м,  $\sigma_{0,2/T} = 650 \cdot 10^6$  Па,  $n = 0,33$ ) при скорости резания  $V = 4$  м/мин, полуширина пластины  $B = 3 \cdot 10^{-3}$  м, глубина резания  $t = 0,14 \cdot 10^{-3}$  м. Обработку производим твёрдосплавной пластиной, угол резания  $\gamma = 80^\circ$ . Границы пластически деформированной зоны, как и длину контакта стружки с передней поверхностью резца примем согласно экспериментальным данным работы [9]:  $X_0 = -2,29 \cdot 10^{-3}$  м,  $C \cong 0,5 \cdot 10^{-3}$  м. Расчёт интенсивности деформации выполним в конечный момент времени  $t_k = (|X_0| + C)/V$ .

Для исследования характеристик микростружки материала при обтекании абразивного зерна рассмотрим процесс деформирования стружки при врезании единичного корундового зерна на операции круглого врезного шлифования сплава ХН77ТЮР кругом

ПП600Х40Х305 24А40МСМ15К1 при следующих режимах: скорость шлифования  $V_k = 35$  м/с, линейная скорость вращения детали  $V_\partial = 0,65$  м/с, радиальная подача на врезание  $S_n = 2 \cdot 10^{-5}$  м/с, средняя толщина стружки, снимаемой одним зерном за проход  $a_z = 4,45 \cdot 10^{-6}$  м. В целях упрощения расчётов примем, что зерно представляет собой частный случай эллипсоида вращения — сферу. Тогда полуширину реза найдем из выражения

$$B = \sqrt{2da_z - a_z^2},$$

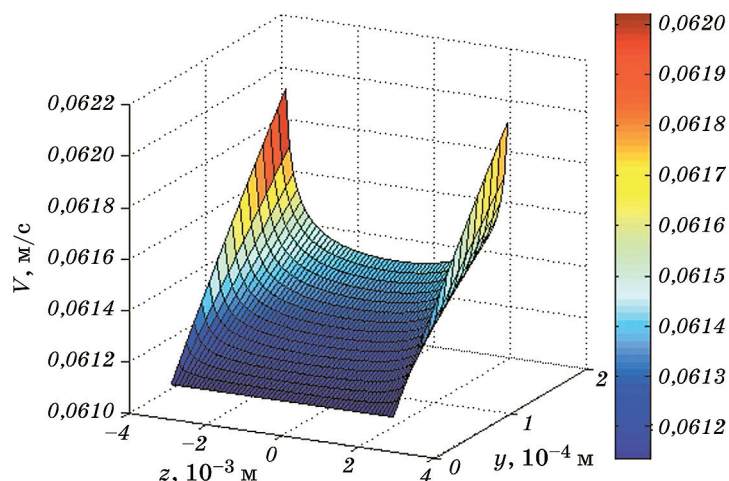
где  $d = 0,4 \cdot 10^{-3}$  м — размер зерна основной фракции абразивного инструмента. Границы пластически деформированной зоны выберем из соотношения  $a_z/x_0 \cong 0,3-0,4$ , что справедливо для труднообрабатываемых сплавов [5]. Длину контакта стружки и передней поверхности зерна определим по формуле

$$C = \left[ \frac{\pi}{2} - \arccos \left( 1 - \frac{2a_z}{d_{зеп}} \right) \right] \frac{d_{зеп}}{2}.$$

Расчёт интенсивности деформаций проведем также в конечный момент времени  $t_k = (|X0| + C)/V_k$ . Тогда в нашем случае  $B = 4,195 \cdot 10^{-5}$  м,  $X0 = -1,483 \cdot 10^{-5}$  м,  $C = 2,7189 \cdot 10^{-4}$  м,  $t_k = 8,19 \cdot 10^{-6}$  с,  $\gamma = 101,3$ .

Построим графики, отображающие изменение поля скоростей перемещений, интенсивности скоростей деформаций, интенсивности деформаций и плотности дислокаций, используя формулы (4), (7)–(11). Построение будем выполнять в координатах  $YZ$  при фиксированном значении абсциссы ( $X = -2,1 \cdot 10^{-3}$  м — для пластины и  $X = -0,4 \cdot 10^{-5}$  м — для абразивного зерна). Решение проводить анализ полей в предложенных координатах было нами принято по ряду причин. Так, использование для построения поверхностей других переменных, например  $XU$ , во-первых, принципиально не будет отличаться по характеру от полей, полученных нами в работе [1], а во-вторых, — не даёт возможности отследить симметрию графиков относительно плоскости  $XU$  и изменение характеристик вблизи границ режущих элементов.

Все построенные графики отличает симметрия относительно плоскости  $XU$ . Из построений (рис. 2, 3) можно отметить увеличение скорости перемещения частиц металла вблизи границ режущих элементов и различное влияние координаты  $Y$  на скорость частиц при обтекании пластины и зерна. Так, для пластины наблюдается прямо пропорциональная зависимость скорости от ординаты, а для абразивного зерна при общей тенденции к увеличению скорости перемещений с ростом ординаты заметно наличие «кармана» — уменьшение скорости до некоторого минимума с последующим

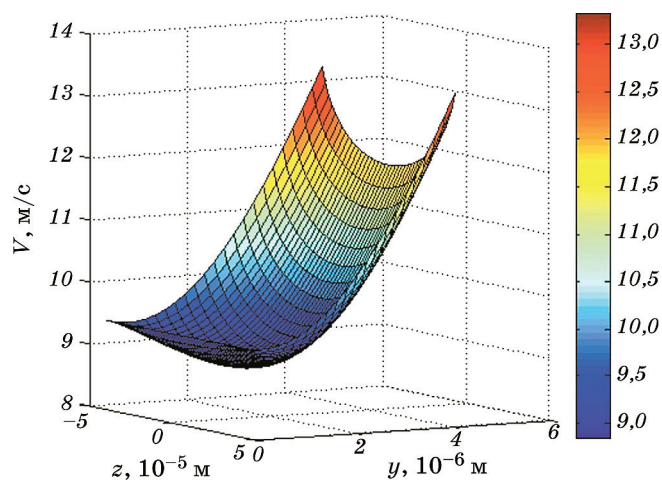


**Рис. 2.** Поле скоростей перемещений частиц при обтекании пластины.

**Fig. 2.** The velocity field of particle displacements wrapping around cutter.

резким увеличением. Такое поведение графиков объясняется совместным влиянием двух составляющих —  $V_x(x, y, z)$  и  $V_y(x, y, z)$ , закон изменения которых по ординате существенно отличается.

Наличие плоскости сдвига перед резцом, наклоненной к поверхности резания, приводит к уменьшению  $V_x$  составляющей по мере



**Рис. 3.** Поле скоростей перемещений частиц при обтекании эллиптического зерна.

**Fig. 3.** The velocity field of particle displacements wrapping around elliptical grain.

роста ординаты за счёт торможения частиц металла по ходу приближения к ней. Вместе с этим рост ординаты изменяет параметры траектории движения частиц, увеличивая большую полуось гиперболы, что способствует значительному возрастанию  $V_y$ , которое компенсирует падение  $V_x$  и приводит к увеличению результирующей скорости движения. Влияние на интегральную скорость  $V_x$  и  $V_y$  при обтекании абразивного зерна будет аналогичным, с той лишь разницей, что при отрицательных передних углах плоскость сдвига будет иметь меньший угол наклона к поверхности резания. Это приводит к более резкому падению  $V_x$  и «отставанию» от него в росте  $V_y$  при малых значениях  $Y$ . При дальнейшем увеличении ординаты градиент роста  $V_y$  позволяет компенсировать уменьшение  $V_x$  и способствует увеличению общей скорости, что объясняет экстремальный характер функции и наличие минимума (рис. 3).

Наибольшая интенсивность скоростей деформаций для пластины отмечается при малых значениях ординаты (рис. 4), в то время как для корундового зерна — равномерно возрастает по  $Y$  (рис. 5). Следует подчеркнуть, что закон изменения интенсивности скоростей деформации для обоих рассматриваемых случаев существенно зависит от координаты  $X$ . Так, для пластины функция интенсивности деформаций является возрастающей, а для зерна — убывающей. Таким образом, можно, увеличив абсциссу, получить график изменения интенсивности скоростей деформаций для пластины, аналогичный зерну корунда, и наоборот, увеличив абсциссу, для корунда — график, подобный представленному на рис. 4. Отличие на пять порядков интенсивностей скоростей деформаций пластины от абра-

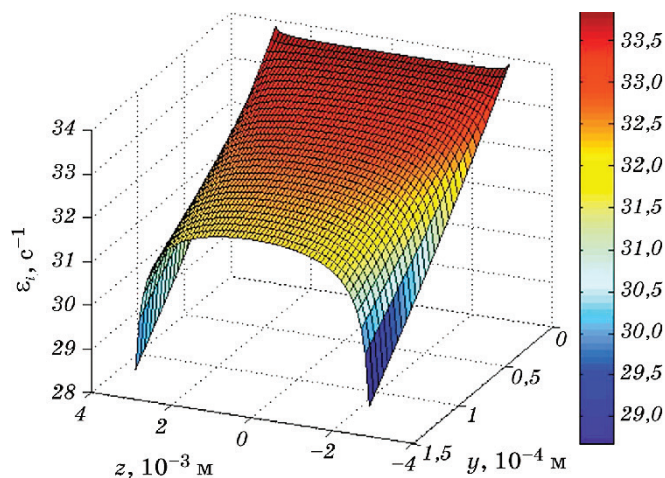
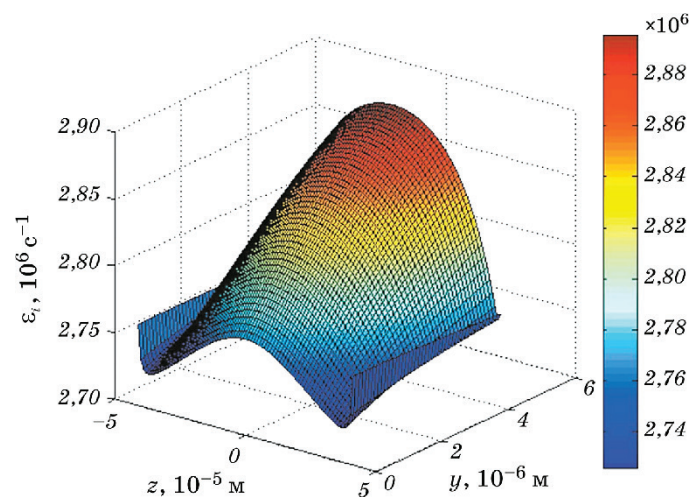


Рис. 4. Интенсивность скоростей деформаций при обтекании пластины.

Fig. 4. The strain rate intensity wrapping around cutter.

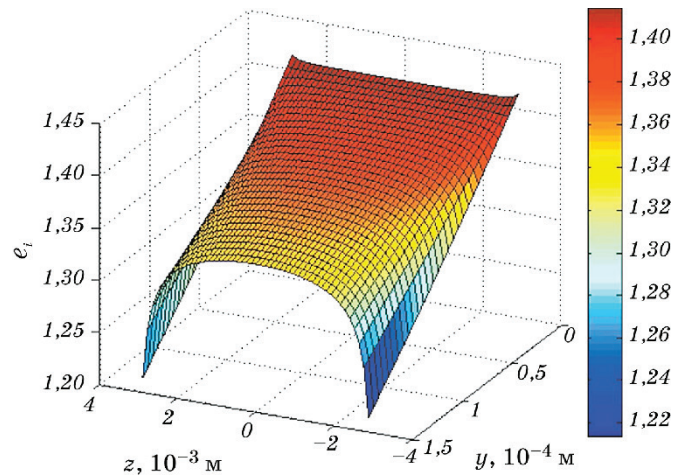


**Рис. 5.** Интенсивность скоростей деформаций при обтекании эллиптического зерна.

**Fig. 5.** The strain rate intensity wrapping around elliptical grain.

живного зерна является следствием расходимости более, чем на два порядка скоростей резания и, по всей видимости, разницей в масштабах деформируемых объёмов.

В целом характер изменения интенсивностей деформаций и интенсивностей скоростей деформаций одинаков как для пластины,



**Рис. 6.** Интенсивность деформаций при обтекании пластины.

**Fig. 6.** The deformation intensity wrapping around cutter.

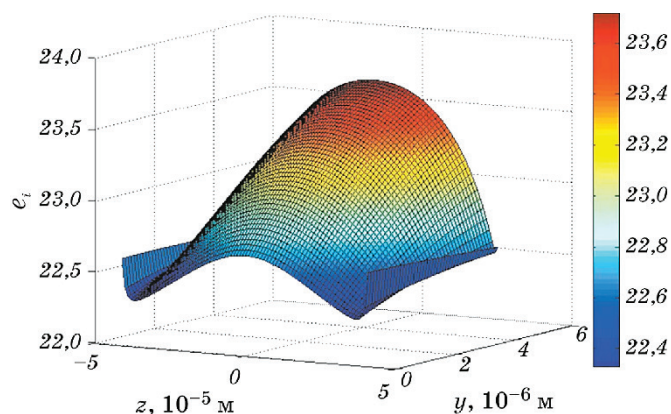


Рис. 7. Интенсивность деформаций при обтекании эллиптического зерна.

Fig. 7. The deformation intensity wrapping around elliptical grain.

так и для зерна (рис. 4, 6) и (рис. 5, 7). Большие на порядок значения интенсивностей деформаций при абразивной обработке также объясняются существенно большими скоростями деформирования.

Изменение плотности дислокаций в зонах деформирования (рис. 8, 9) согласуется с интенсивностью деформаций и находится в допустимых пределах для деформированного материала. В случае абразивной обработки отчетливо видны всплески на границах кромок. Важно отметить, что при обтекании абразивного зерна (рис. 9)

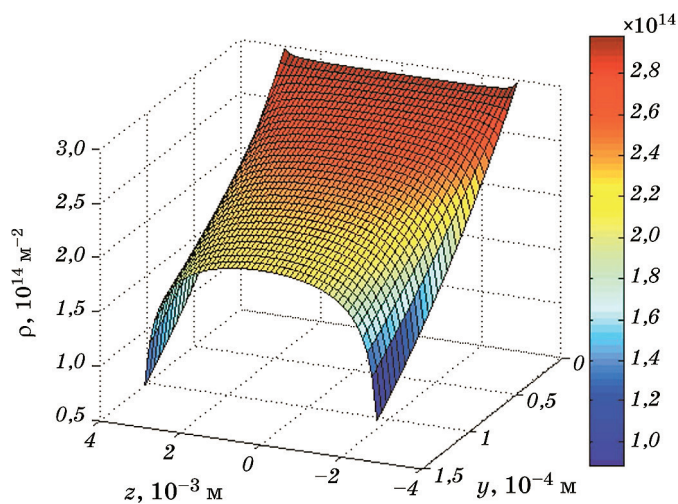


Рис. 8. Плотность дислокаций при обтекании пластины.

Fig. 8. The dislocations density wrapping around cutter.



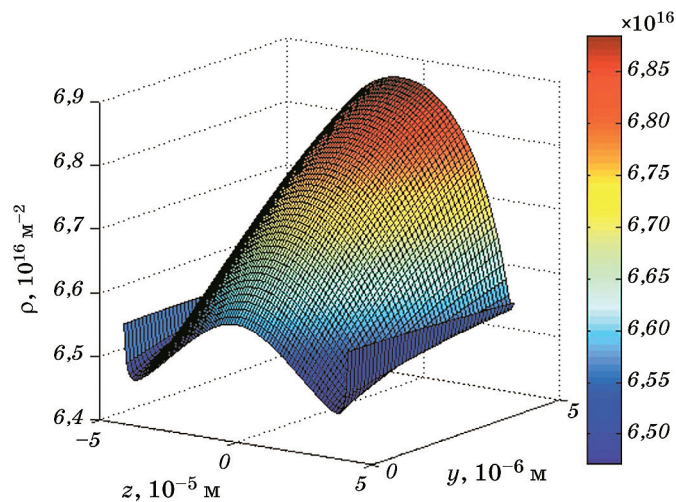


Рис. 9. Плотность дислокаций при обтекании эллиптического зерна.

Fig. 9. The dislocations density wrapping around elliptical grain.

плотность дислокаций предельная и предшествует разрушению материала. Достоверно известно, что процесс микрорезания при шлифовании происходит при очень высоких значениях мгновенных температур, превышающих температуры плавления металла, о чём свидетельствует наблюдаемый на практике сноп искр. При этом сам характер деформации можно рассматривать как адиабатический сдвиг с локализацией тепла в удаляемом материале и значительным его деформированием и размягчением вплоть до оплавления. Таким образом, полученная картина изменения плотности дислокаций (рис. 9) согласуется с физикой процесса микрорезания наблюдаемой при шлифовании, что подтверждает состоятельность наших модельных представлений.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя индуктивное умозаключение как процесс логического вывода, нами сформулирован постулат, служащий основой для построения поля скоростей перемещений частиц при пластическом течении металла, суть которого сводится к тому, что векторное поле скоростей перемещений частиц деформируемого металла с учётом его несжимаемости в рассматриваемой области должно быть соленоидальным или вихревым.

Получил дальнейшее развитие метод гипербол, на основе которого разработаны уравнения полей скоростей перемещений частиц металла, при обтекании пластины и абразивного зерна в условиях

несвободного резания. Отличительной особенностью полученных уравнений является наличие третьей независимой переменной, что позволяет проводить исследования деформированного состояния срезаемого слоя в пространстве.

Результаты исследования могут быть использованы для построения картины течения металла и анализа деформированного состояния срезаемого слоя при различных схемах и видах несвободного резания, например для случая использования сложнопрофильного инструмента, путём разбиения фасонной режущей кромки на составные части.

Рассмотрены два конкретных примера обтекания стружкой режущей пластины при протягивании и абразивного зерна при врезном шлифовании, результаты расчёта которых подтвердили правильность наших модельных представлений. Так, нами установлено, что картина изменения плотности дислокаций в зонах деформирования повторяет форму режущих кромок, согласуется с интенсивностью деформаций и находится в допустимых пределах для деформированного материала. Плотность дислокаций при обтекании эллиптического зерна, в отличие от пластины, предельная с характерными всплесками на границах кромок, что подтверждает наличие адиабатического сдвига с локализацией тепла в удаляемом материале и его значительное деформирование и размягчение вплоть до оплавления. Полученная картина изменения плотности дислокаций согласуется с физикой процессов резания.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Курин, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 7: 859 (2018).
2. О. В. Жедь, *Вестн. Российского университета дружбы народов. Сер.: Инженерные исследования*, № 2: 39 (2008).
3. В. Ф. Бобров, *Основы теории резания металлов* (Москва: Машиностроение: 1975).
4. А. И. Долматов, С. Н. Нижник, М. А. Курин, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 2: 31 (2011).
5. С. А. Капашин, *Разработка и внедрение технологического процесса тонкого шлифования крупногабаритных лопаток ГТД* (Дисс. канд. техн. наук) (Харьков: НАУ «ХАИ»: 1988).
6. Tresa M. Pollock and Richard LeSar, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, **17**, Iss. 1: 10 (2013).
7. М. О. Курин, М. В. Сурду, *Металлофиз. новейшие технол.*, **39**, № 3: 401 (2017).
8. ГОСТ 25.503–97. *Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие* (Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: 1997).
9. В. К. Старков, *Физика и оптимизация резания материалов* (Москва:



Машиностроение: 2009).

## REFERENCES

1. M. O. Kurin, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 7: 859 (2018) (in Russian).
2. O. V. Zhed', *RUDN J. Eng. Res.*, No. 2: 39 (2008) (in Russian).
3. V. F. Bobrov, *Osnovy Teorii Rezaniya Metallov* [Fundamentals of the Cutting Metals Theory] (Moscow: Mashinostroenie: 1975) (in Russian).
4. A. I. Dolmatov, S. N. Nyzhnyk, and M. A. Kurin, *Aerospace Engineering and Technology*, No. 2: 31 (2011) (in Russian).
5. S. A. Kapashin, *Razrabotka i Vnedrenie Tekhnologicheskogo Protsessa Tonkogo Shlifovaniya Krupnogabaritnykh Lopatok GTD* [Development and Implementation of Fine Grinding Process of Large-Size GTE Blades] (Dissertation for Cand. Tech. Sci.) (Kharkiv: NAU 'KhAI': 1988) (in Russian).
6. Tresa M. Pollock and Richard LeSar, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, **17**, Iss. 1: 10 (2013).
7. M. O. Kurin and M. V. Surdu, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 3: 401 (2017) (in Ukrainian).
8. GOST 25.503–97. *Raschety i Ispytaniya na Prochnost. Metody Mekhanicheskikh Ispytaniy Metallov. Metod Ispytaniya na Szhatie* [Design Calculation and Strength Testing. Methods of Mechanical Testing of Metals. Method of Compression Testing] (Minsk: Mezhdgosudarstvennyi Sovet po Standartizatsii, Metrologii i Sertifikatsii: 1997) (in Russian).
9. V. K. Starkov, *Fizika i Optimizatsiya Rezaniya Materialov* [Physics and Optimization of Cutting Materials] (Moscow: Mashinostroyeniye: 2009) (in Russian).