

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

УДК 621.9.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

А.В. Филиппов, А.В. Проскоков

Юргинский технологический институт (филиал) Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
г. Юрга, Кемеровская обл., Российская Федерация
e-mail: avf@tpu.ru

Рассмотрен новый метод спекл-интерферометрии, при котором вследствие пластической деформации при резании происходит изменение микроструктуры поверхности торца обрабатываемого резцом диска в зоне резания, что вызывает смещение наблюдаемого спекла. Постоянное сравнение изменяющихся кадров спеклов позволяет судить о процессе деформирования в течение времени наблюдения. Изложена методика использования цифровой корреляционной спекл-интерферометрии для изучения процесса свободного резания на основе анализа векторных полей перемещения, направлений перемещений, компонент относительной деформации и скорости деформации. Приведено сравнение картин деформации при резании инструментом с различной геометрией режущего клина. Метод цифровой корреляционной спекл-интерферометрии имеет высокую разрешающую способность и относительно недорогое приборное обеспечение. Рассмотрен способ экспериментального определения деформации в зоне стружкообразования при свободном резании металлов. Приведены описание эксперимента и требования для его реализации. Представлены векторные поля перемещения деформируемого материала. Приводится расчет деформации и скорости деформации по полученным экспериментальным данным.

Ключевые слова: пластическая деформация, обработка резанием, цифровая корреляция изображения, спекл-интерферометрия.

STUDY OF CHIP FORMING IN CUTTING METALS USING THE METHOD OF DIGITAL CORRELATION SPECKLE INTERFEROMETRY

A.V. Filippov, A.V. Proskokov

Yurginskii Technological Institute (Branch) of National Research Tomsk Polytechnic
University, Yurga, Kemerovo region, Russian Federation
e-mail: avf@tpu.ru

Using the new method of speckle interferometry is considered, when due to plastic deformation during the cutting, the microstructure of the surface of the disc face processed by the cutter changes in the cutting area, which causes a shift of the observed speckle. Continuous comparison of the changing frames of speckles makes

it possible to follow the process of deforming during the observation time. A technique is set forth for using the digital correlation speckle interferometry to study a process of free cutting on the basis of analysis of vector fields of displacement, directions of displacements, components of a relative strain and a strain rate. The comparison of deformation patterns in cutting by a tool with different geometry of the cutting wedge is given. A new highly accurate means for investigation and optimization of the cutting process is proposed; it is the method of digital correlation speckle interferometry having a high resolution and the relatively inexpensive instrument support. A method is considered for experimental determination of strain in the area of chip forming during the free cutting of metals. The description of experiment procedure and requirements to its implementation are given. The vector fields of displacement of deformed material are presented. The calculation of a strain and a strain rate from the obtained experimental data is given.

Keywords: plastic deformation, treatment by cutting, digital correlation of image, speckle interferometry.

Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в зоне стружкообразования является основой при определении закономерностей процесса резания. Данные механики процесса стружкообразования позволяют рассчитывать силы резания, определять контактные напряжения на гранях режущего инструмента и прогнозировать его износ (разрушение), управлять видом образующейся стружки, обеспечивать ее стабильное завивание и дробление, а также влиять на формирование обработанной поверхности. Вопросам выявления закономерностей при резании металлов посвящены многочисленные работы [1–7].

Процесс деформации металла при резании достаточно сложен, поэтому наряду с теоретическими выводами в математическом описании важную роль играют экспериментальные методы исследований. Наблюдение за боковой поверхностью экспериментальных образцов является одним из распространенных методов изучения стружкообразования в условиях свободного прямоугольного резания. При этом в зоне стружкообразования определяются границы зоны пластической деформации и траектории перемещения частиц металла — так называемые линии тока. Данный метод был использован еще в первых научных исследованиях процесса резания русскими учеными Тиме И.А., Зворыкиным К.А. [8].

Большие возможности имеет металлографический метод, заключающийся в изучении микроструктуры деформированных областей. Исследования проводят на так называемом корне стружки, который фиксируют мгновенным прерыванием процесса резания. При этом образец перед изучением проходит дополнительную подготовку: полирование и травление [9].

Наиболее точным и информативным до сегодняшнего дня считался метод сеток. На исследуемый образец наносят делительную сетку в виде системы окружностей или прямых линий. При этом с целью

избежать краевых эффектов образец выполняется составным, а сетка помещается в среднем сечении. По искажению элементов сетки определяют границы зоны пластической деформации, в которой с помощью общепринятых соотношений в каждой точке зоны стружкообразования рассчитывают деформации и скорости деформаций [10].

В связи с малыми размерами исследуемой области и большими градиентами деформаций применение описанного метода сопряжено с рядом экспериментальных трудностей. Во-первых, сетка должна быть достаточно прочной, чтобы не терять контрастности при больших деформациях. Во-вторых, размеры элементов сетки необходимо выполнять достаточно малыми, чтобы при значительных градиентах деформаций считать ее в пределах одной ячейки однородной.

Также известны методы определения полей деформаций с помощью хрупких тензочувствительных покрытий, муаровых полос, оптически чувствительных покрытий, голографической интерферометрии, измерений по отдельным точкам с использованием тензометров [11], но протекающие в зоне стружкообразования пластические деформации делают невозможным применение датчиков и большинства покрытий при исследовании процесса резания металлов.

Измерение деформаций методом голографической и спекл-интерферометрии. В последние годы для определения НДС ответственных узлов и элементов машиностроительных конструкций все чаще применяют экспериментальные методы голографической и спекл-интерферометрии. В отличие от метода сеток, они используются для измерения перемещений и деформаций на всей исследуемой поверхности, а не в одной точке. При этом результаты измерений, полученные этими методами, имеют высокую точность и информативность.

В работе [12] представлен метод исследования НДС режущей части инструмента в процессе его работы. Для получения изображения исследуемого клина полупрозрачное зеркало при съемке размещается так, чтобы на него падали не только лучи света от освещенного лазерным светом исследуемого клина, но и свет от лазера. Возникает интерференционная картина взаимодействия двух пучков света, которая регистрируется фото- или видеоаппаратурой. Затем полученная запись просматривается на замедленной скорости и по изображениям графически рассчитываются порядки интерференционных полос, которые пересчитываются в поперечные деформации.

В результате были получены данные о НДС инструмента в процессе его работы в разные моменты времени. Представленный метод используется для исследования упругих деформаций режущего клина

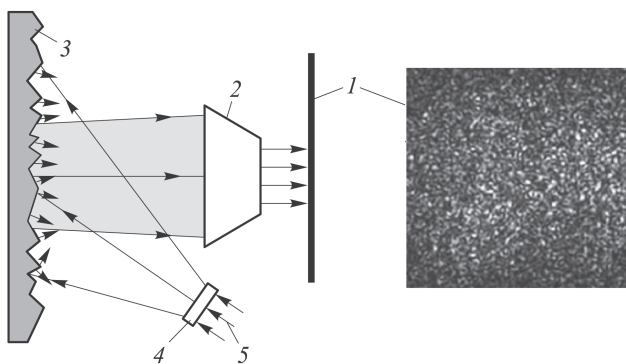


Рис. 1. Оптическая схема регистрации спекл-картин:

1 — спекл-картина, 2 — фотообъектив, 3 — объект исследования, 4 — расширитель пучка, 5 — луч лазера

инструмента, но не может применяться для исследования зоны стружкообразования из-за протекающих в ней пластических деформаций.

Одним из методов повышения информативности и наглядности протекающих во времени процессов является цифровая корреляционная спекл-интерферометрия, которую сравнительно недавно начали применять для исследования процессов деформации материалов [13].

По сравнению с голографией спекл-интерферометрия имеет ряд преимуществ: повышенную точность измерения деформаций за счет устойчивости к колебаниям механической системы, несложную конструкцию оптической системы с использованием маломощного источника когерентного излучения, более четкую интерференционную картину.

Этот метод использует зернистость сфокусированного изображения спеклы (рис. 1) и позволяет регистрировать и выполнять прямые измерения с точностью до $\lambda/10$, где λ — длина волны лазерного излучения [14]. Спеклы являются носителями измерительной информации и имеют дифракционную природу. Они существуют благодаря рассеянию света на шероховатой поверхности образца, а также в результате ограниченного предела разрешения используемых оптических элементов — объективов [15].

При использовании лазерного излучения в качестве источника когерентного света получают объективную спекл-картину, которую регистрируют либо фотографированием, либо видеозаписью исследуемого процесса (см. рис. 2). При этом минимальные размеры спеклов определяются по следующим выражениям [16]:

$$\varepsilon_{\perp} = 3\lambda z/D \quad (1)$$

— в поперечном направлении;

$$\varepsilon_{\parallel} = 8\lambda z/D \quad (2)$$

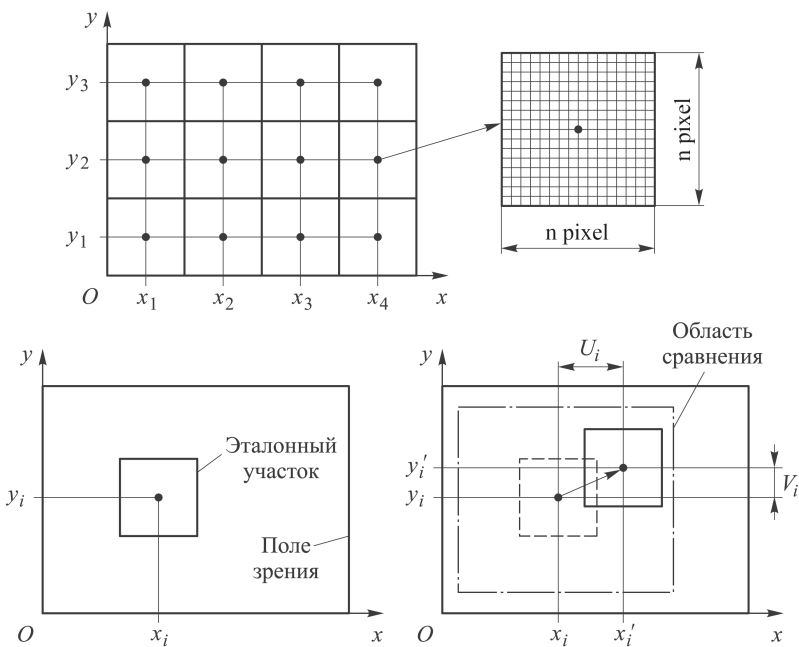


Рис. 2. Схема-алгоритм построения вектора перемещения

— в продольном направлении, где λ — длина волны источника когерентного света (лазера); z — фокусное расстояние линзы (объектива); D — диаметр отверстия линзы (апертура объектива).

Как следует из формул (1) и (2), размер спеклов и качество регистрируемого изображения в целом зависят от характеристик оптической аппаратуры: объектива, камеры и лазера.

Для анализа процессов деформации с заданным интервалом времени берется ряд отдельных кадров с изображением исследуемой области на различных стадиях деформации. Каждый кадр делится на определенное число эталонных участков и представляет собой сетку пикселей размером ($n \times n$ pixel) (см. рис. 2). Размер пикселя определяется параметрами матрицы регистрирующей видеокамеры.

Каждому эталонному участку до деформации присваиваются координаты (x_i, y_i) , а на последующем изображении рассчитываются координаты (x'_i, y'_i) , определяющие положение того же участка после некоторой деформации. Таким же образом должны рассчитываться значения проекций вектора перемещения на координатные плоскости для каждого участка поля зрения регистрирующей аппаратуры:

$$\vec{U}_i = x_i - x'_i \quad (3)$$

— горизонтальная (абсцисс) ось;

$$\vec{V}_i = y_i - y'_i \quad (4)$$

— вертикальная (ординат) ось.

Положение эталонного участка на изображении объекта после некоторой деформации находят по координатам глобального экстремума функционала S , определяемого в пределах области сравнения:

$$S = \sum_{\Omega} f(I_1, I_2),$$

где I_1 и I_2 — массивы значений яркости изображений; $f(I_1, I_2)$ — мера близости; Ω — область сканирования.

Ряд требований, предъявляемых к регистрирующей аппаратуре и свойствам поверхности экспериментальных образцов, также накладывает некоторые ограничения на возможность реализации процесса спекл-интерферометрии.

Во-первых, перемещение каждого эталонного участка на изображении должно находиться в пределах ячейки на двух соседних кадрах, а путь частиц деформируемого материала, преодолеваемый за некоторое время (t), должен быть меньше размера эталонного участка. Таким образом, скорость деформаций должна быть сопоставима с частотой смены кадров при видеосъемке, что выражается соотношением

$$tV < L, \quad (5)$$

где t — время регистрации двух последовательных кадров; V — скорость деформации в исследуемой области; L — размер ячейки.

Во-вторых, для регистрации четкой и контрастной спекл-картины в целях устранения отблесков света от исследуемой поверхности на экспериментальных образцах должна быть матовая поверхность, а также для осуществления фазовых сдвигов $\Delta\varphi$ лазерного излучения нужно, чтобы высоты неоднородностей поверхности Δh были сравнимы с длиной волны лазерного излучения λ , в следующем соотношении [16]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2\Delta h. \quad (6)$$

Методика проведения экспериментального исследования. В целях применения метода цифровой корреляционной спекл-интерферометрии для исследования процесса деформации в зоне стружкообразования при резании металлов были проведены эксперименты, в которых осуществлялось точение металлических образцов. При проведении экспериментов проводилась видеосъемка зоны резания (рис. 3) с помощью цифровой монохроматической видеокамеры. Зона резания подсвечивалась лазером с длиной волны $\lambda = 635$ нм.

Математический анализ видеофрагментов с результатами экспериментов позволил получить векторные поля перемещений в исследуемой области (см. рис. 4).

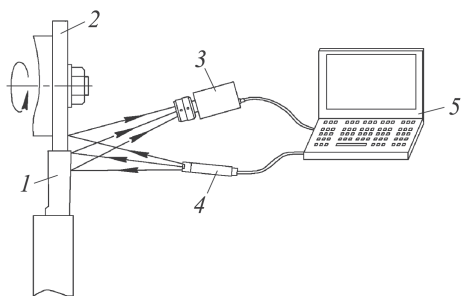


Рис. 3. Схема исследования деформаций материала при резании с применением метода спекл-интерферометрии:

1 — инструмент; 2 — объект исследования; 3 — цифровая видеокамера; 4 — лазер с расширителем пучка; 5 — персональный компьютер

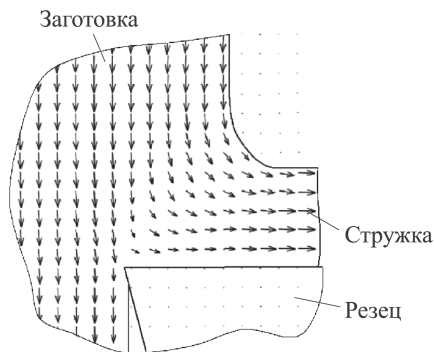


Рис. 4. Векторное поле деформаций в исследуемой области

Вектор деформации характеризуется двумя свойствами: суммарным значением перемещения \vec{V}_{si} и направлением смещения точки W_i в выбранной системе координат:

$$\vec{V}_{si} = \vec{U}_i + \vec{V}_i; \quad (7)$$

$$W_i = \arctg(\vec{U}_i / \vec{V}_i), \quad (8)$$

где \vec{U}_i и \vec{V}_i — проекции вектора перемещения на координатные оси в декартовой системе координат.

После объединения в разных диапазонах значений компонент векторов получены области с равными перемещениями деформируемого материала и равными направлениями смещения участков. На рис. 5 показаны значения (в мкм) компоненты суммарных перемещений для различных геометрических форм режущего клина при резании меди М1 со скоростью 13 мм/мин. На представленных картинах равных перемещений выделяется тот факт, что в исследуемой зоне деформации всегда наблюдается область заторможенного слоя вблизи вершины инструмента, в которой перемещение частиц достигает минимальных значений и даже останавливается. При этом размеры этих областей при обработке резцами с радиусом закругления (рис. 5, з) или фаской (рис. 5, д) больше, чем у заостренных резцов с передним углом $\gamma = 10^\circ$ (рис. 5, б) и $\gamma = 0^\circ$ (рис. 5, а). Также во всех случаях наблюдается уменьшение значений перемещения деформируемого материала по мере его приближения к вершине инструмента. Однако стоит заметить, что процессы накопления и формирования застойной зоны будут различны при разной геометрии инструмента.

На рис. 6 приведены области равных углов, характеризующих направления векторов перемещения деформируемого материала в

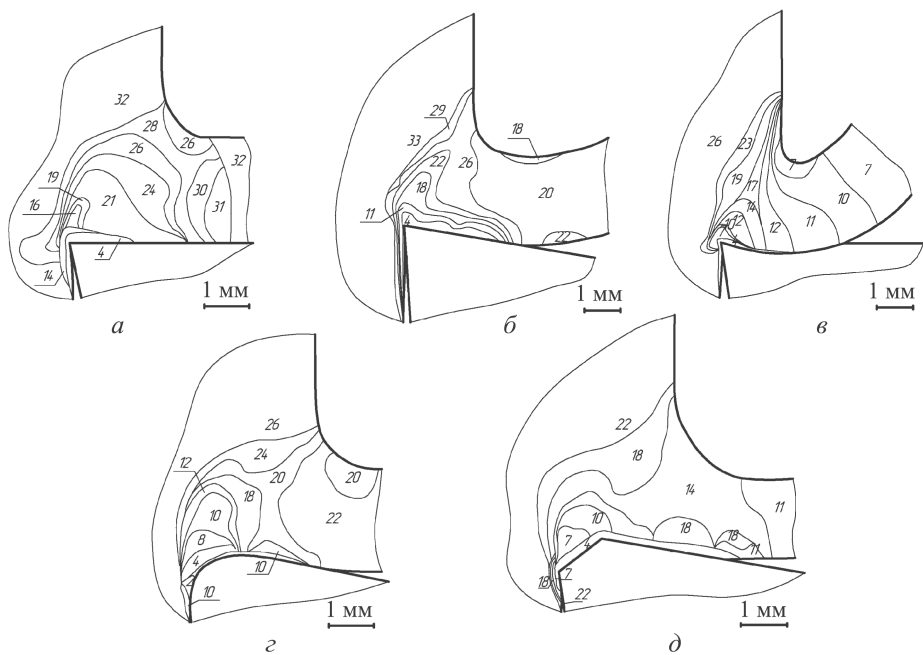


Рис. 5. Области перемещений материала при свободном резании меди М1 резцом со скоростью $v = 13$ мм/мин:

$a - \gamma = 0^\circ$; $б - \gamma = 10^\circ$; $в -$ с радиусной канавкой; $г -$ с радиусом закругления; $д -$ с фаской при вершине

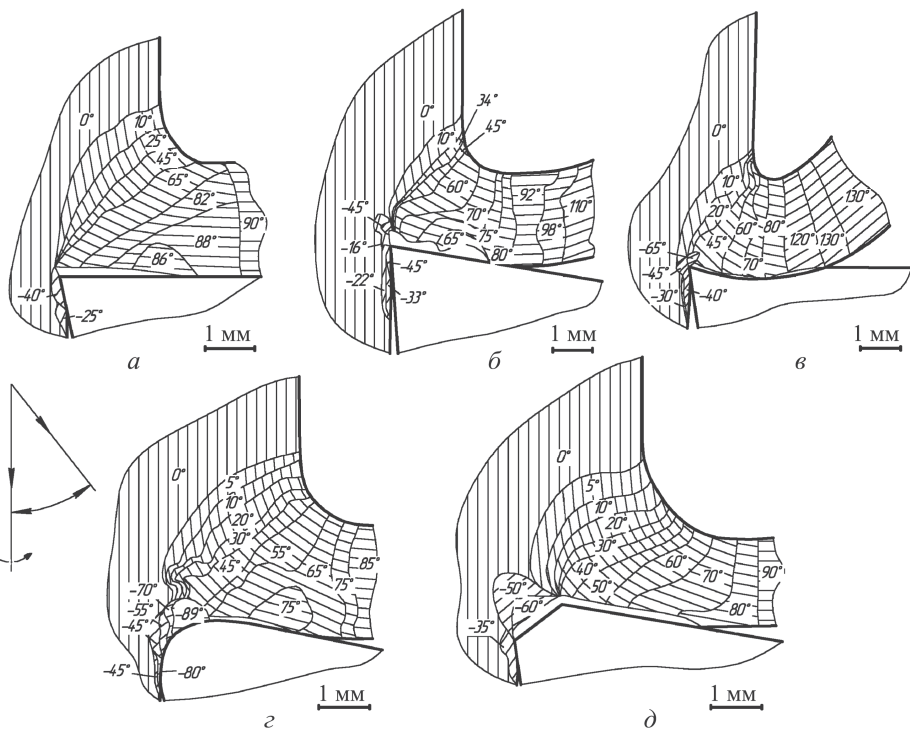


Рис. 6. Области направлений перемещений материала при свободном резании меди М1 резцом со скоростью $v = 13$ мм/мин:

($a-d$ – см. рис. 5)

плоскости наблюдения. По этим картинам можно определить границу зоны распространения деформационных процессов в заготовку, а также границу области, в которой происходит разделение движения материала в стружку и заготовку. Изменение значений углов векторов перемещения на задней поверхности инструмента указывает на упругую деформацию, при которой материал сначала вдавливается в заготовку, а затем частично возвращается к свободной поверхности заготовки.

Анализ полей деформации в зоне стружкообразования. При построении картин деформации была принята координатная система ZOY : OZ — вертикальная, OY — горизонтальная.

Поскольку в процессе экспериментов наблюдение велось только за боковой поверхностью, то рассчитывать будем только плоскодеформированное состояние:

$$\varepsilon_x = 0. \quad (9)$$

Тогда компоненты тензора деформаций выразим через перемещения точек \vec{U}_i и \vec{V}_i деформируемого материала по формулам (8):

$$\varepsilon_y = \frac{dU_i}{dy}; \quad \varepsilon_z = \frac{dV_i}{dz}; \quad \gamma_{zy} = \frac{dV_i}{dy} + \frac{dU_i}{dz}. \quad (10)$$

Формулы (8) составляют тензор деформаций

$$T = \begin{vmatrix} \varepsilon_z & \frac{1}{2}\gamma_{zy} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_y \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Интенсивность деформации определим как

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_y^2 + \frac{3}{2} \gamma_{zy}^2}. \quad (12)$$

На рис. 7 приведено распределение деформации в зоне стружкообразования при свободном резании меди М1. Цифрами обозначены значения относительных деформаций ε_x , ε_y (a , b), относительных сдвигов γ_{xy} (β) и интенсивности деформации ε_i (z) в зоне резания, рассчитанные по формулам (8)–(10).

Порядок значений относительных деформаций для компонент ε_z и ε_y одинаков, но их распределение в зоне стружкообразования различно. Положительные знаки перед значениями деформаций показывают зону растяжения, а отрицательные — сжатие в пластической зоне деформации. Это указывает на сложные механизмы формирования НДС в зоне стружкообразования. Картина распределения деформации сдвига γ_{zy} наглядно формирует границы пластической деформации материала и застойной зоны в прирезцовом слое.

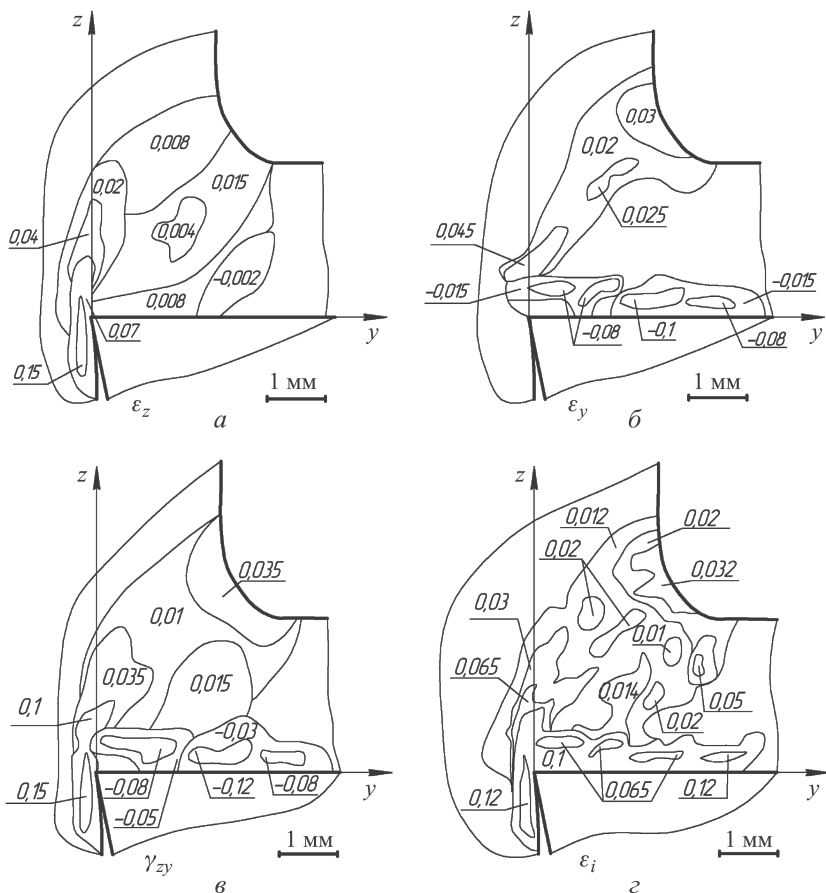


Рис. 7. Области относительной деформации в зоне стружкообразования при свободном резании меди М1 со скоростью $V = 13$ мм/мин резцом с передним углом $\gamma = 0^\circ$

Значения интенсивности деформации ε_i возрастают от границы пластической области к вершине резца. Наибольшие значения интенсивности деформации наблюдаются вблизи вершины резца, а также на площадках контакта стружки с передней поверхностью инструмента и заготовки с задней поверхностью инструмента.

Для расчета скорости деформаций при установившемся пластическом течении необходимо соответствующие компоненты деформации продифференцировать по времени, в течение которого происходили перемещения деформируемых точек [18]. Этот параметр выразим формулами:

$$\begin{aligned}
 v_z &= \frac{dU_i}{dt}; & v_y &= \frac{dv_i}{dt}; & \dot{\varepsilon}_z &= \frac{dv_z}{dz}; \\
 \dot{\varepsilon}_y &= \frac{dv_y}{dy}; & \dot{\gamma}_{zy} &= \frac{dv_z}{dy} + \frac{dv_y}{dz}.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Применение подобных формул (11) является допустимым, поскольку идет построение поля скоростей деформации в пределах двух последовательных кадров видеозаписи с фиксированным временным интервалом (dt) и, следовательно, протекающие деформации можно считать достаточно малыми.

Интенсивность скорости деформации, которую, по условию Леви-Мизеса, связывают с напряженным состоянием в зоне резания [19], определяют по формуле

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_y)^2 + \dot{\epsilon}_z^2 + \dot{\epsilon}_y^2 + \frac{3}{2} \dot{\gamma}_{zy}^2}. \quad (14)$$

На рис. 8 представлены картины распределения скорости деформации в зоне стружкообразования при резании меди М1 с временным интервалом смены кадров $dt = 0,04$ с.

Рассмотрим эти картины подробнее. Цифрами обозначены усредненные значения скорости относительной деформации $\dot{\epsilon}_z$, $\dot{\epsilon}_y$ (а, б) и

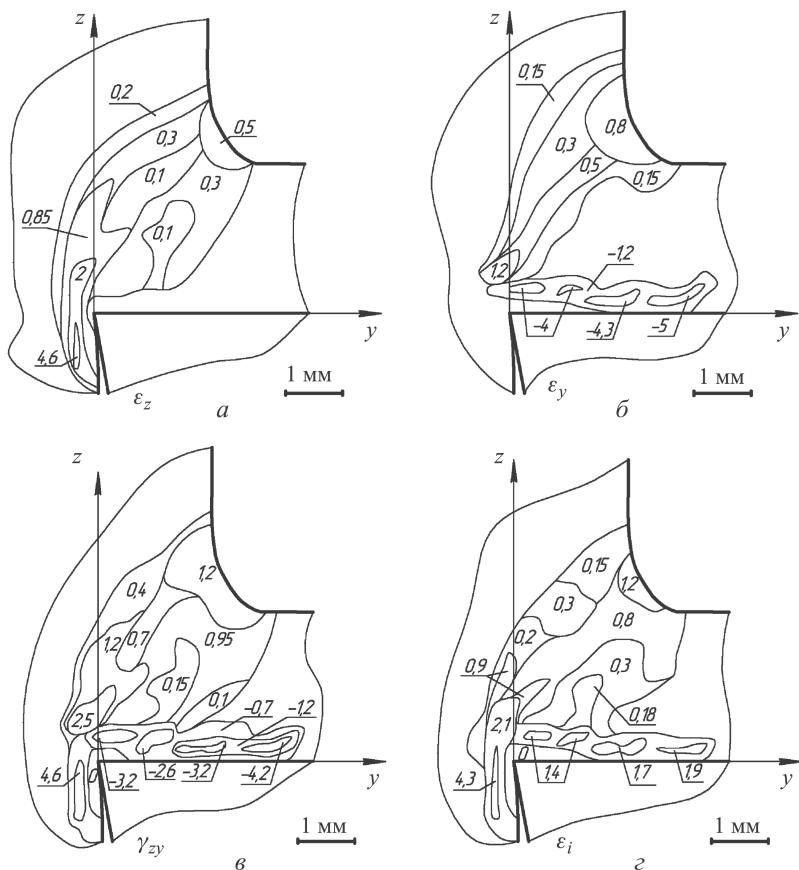


Рис. 8. Распределение областей равной скорости деформации в зоне стружкообразования при резании меди М1 со скоростью $v = 13$ мм/мин резцом с передним углом $\gamma = 0^\circ$

сдвига $\dot{\gamma}_{zy}(\theta)$, а также интенсивности скорости деформации $\dot{\epsilon}_i(z)$, рассчитанные по формулам (11) и (12).

На участке в прирезцовой зоне передней поверхности скорость деформации $\dot{\epsilon}_z$ стремится к нулевым значениям, в то время как $\dot{\epsilon}_y$ достигает максимальных значений и имеет большую протяженность. Относительно задней поверхности картина противоположна, скорость деформации $\dot{\epsilon}_y$ близка нулю, а $\dot{\epsilon}_z$ принимает максимальные значения.

Из рис. 8 следует, что интенсивность скорости деформации $\dot{\epsilon}_i$ вблизи вершины резца формирует застойную область, в которой ее значения равны нулю. Наибольшие же значения $\dot{\epsilon}_i$ находятся у площадки контакта задней поверхности инструмента и заготовки.

Заключение. В настоящей работе продемонстрировано применение современных методов спекл-интерферометрии для определения деформированного состояния зоны стружкообразования при резании металлов. Выявлено, что в зоне стружкообразования происходят сложные деформационные процессы, различные по значению и области распространения.

Полученные значения деформации и скорости деформации согласуются с данными, полученными профессором Куфаревым Г.Л. при схожих условиях проводимых экспериментов [20].

Данные экспериментов позволят на новом качественном уровне оценить характер деформированного состояния в зоне резания, определить границы области пластической деформации, что ляжет в основу математических моделей, наиболее полно раскрывающих физические процессы механики деформирования металлов при резании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг А.М., Насосов К.А. Факторы, влияющие на процесс деформации при резании // Изв. ТПИ. 1957. Т. 85. С. 118–131.
2. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов. М. – Свердловск: Машгиз, 1956. 319 с.
3. Дель Г.Д. Технологическая механика. М.: Машиностроение, 1978. 174 с.
4. Полетика М.Ф. Теория резания: Ч. 1: Механика процесса резания. Томск: Изд-во ТПУ, 2001. 202 с.
5. Куфарев Г.Л., Окенов К.Б., Говорухин В.А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. Фрунзе: Мектеп, 1970. 170 с.
6. Куфарев Г.Л. Скорость деформации в процессе резания пластичного металла. Изв. ТПИ, Т. 96. 1. 1959. С. 11–17.
7. Зорев Н.Н. Исследование элементов механики процесса резания. М.: Машгиз, 1952. 364 с.
8. Зворыкин К.А. Работа и усилие, необходимые для отделения металлических стружек. М.: “Русская” типо-литография, 1893. 80 с.
9. Гольдшидт М.Г. Деформации и напряжения при резании металлов. Томск: STT, 2001. 180 с.
10. Дель Г.Д. Метод делительных сеток. М.: Машиностроение, 1979. 144 с.

11. *Приговорский Н.И.* Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1983. 248 с.
12. *Ефимович И.А.* Циклический характер напряженно-деформированного состояния режущей части инструмента в процессе резания // Вестник машиностроения. 2003. № 7. С. 48–52.
13. *Peters W.H., Ranson W.F.* Digital imaging techniques in experimental stress analysis. Optics and Lasers in Engineering. 1982. Vol. 21. No. 3. P. 427–431.
14. *Борьяняк Л.А., Непочатов Ю.К.* Голографический интерферометр для определения деформационных полей перемещений в изделиях микроэлектроники // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 3. С. 82–88.
15. *Волков И.В.* Внестендовая спекл-голография. Использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натуральных конструкций // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 1. С. 82–89.
16. *Рябухо В.П.* Спекл-интерферометрия // Соровский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 5. С. 1–9.
17. *Сторожев М.В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
18. *Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш.* Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1969. 504 с.
19. *Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю.* Разработка новой теории резания // Вестник машиностроения. 2008. № 4. С. 69–74.
20. *Куфарев Г.Л.* Скорость деформации в процессе резания пластичного материала // Изв. ТПИ, 1959. Т. 96,1. С. 11–17.

REFERENCES

- [1] Rozenberg A.M., Nasosov K.A. Factors influencing the deformation during cutting process. *Izv. Tomskogo politekhnicheskogo instituta*. [Bull. Tomsk Polytechnic Un.], 1957, vol. 85, pp. 118–131 (in Russ.).
- [2] Rozenberg A.M., Eremin A.N. Elementy teorii protsessa rezaniia metallov [The theory elements of metal cutting process]. Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1956. 319 p.
- [3] Del' G.D. Tekhnologicheskaiia mekhanika [Technological mechanics]. Moscow, Mashinostronie Publ., 1978. 174 p.
- [4] Poletika M.F. Teoriia rezaniia: Ch. 1: Mekhanika protsessa rezaniia. [Cutting Theory. Part 1. Mechanics of the cutting process]. Tomsk, Izd. TPU Publ., 2001. 202 p.
- [5] Kufarev G.L., Okenov K.B., Govorukhin V.A. Struzhkoobrazovanie i kachestvo obrabotannoi poverkhnosti pri nesvobodnom rezanii [Chip making and surface quality during constrained cutting]. Frunze: Mektep Publ., 1970. 170 p. (in Russ.).
- [6] Kufarev G.L. Strain rate during the process of ductile metal cutting. *Izv. Tomskogo politekhnicheskogo instituta*. [The Bull. Tomsk Polytechnic Un.], 1959, vol. 96, pp. 11–17 (in Russ.).
- [7] Zorev N.N. Issledovanie jelementov mehaniki processa rezaniia [The studying of mechanics elements of cutting processes]. Moscow, Mashgiz Publ., 1952, 364 p.
- [8] Zvorykin K.A. Rabota i usilie neobhodimye dlja otdeleniia metallicheskih struzhek. [Necessary work and effort to separate the metal chips]. Moscow, "Russkaja" tipolitografija Publ., 1893. 80 p.
- [9] Gol'dshidt M.G. Deformatsii i napriazhenii pri rezanii metallov [Strains and stresses at metal cutting]. Tomsk, STT Publ., 2001. 180 p.
- [10] Del' G.D. Metod delitel'nykh setok [The method of separating meshes]. Moscow, Mashinostronie Publ., 1979. 144 p.
- [11] Prigovorskii N.I. Metody i sredstva opredeleniia polei deformatsii i napriazhenii [Methods and techniques of definition of deformation fields and stresses]. Moscow, Mashinostronie Publ., 1983. 248 p. (in Russ.).

- [12] Efimovich I.A. Cyclic mode the stress-strain state of the tool cutting part during the cutting process. *Vestn. mashinostr.* [Russ. Eng. Res.], 2003, no. 7, pp. 48–52 (in Russ.).
- [13] Peters W.H., Ranson W.F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, 1982, vol. 21, no. 3, pp. 427–431.
- [14] Boryniak L.A., Nepochatov Iu.K. Holographic interferometer for detection of the displacements deformation fields in microelectronics products. *Tekhnologii v elektronnoi promyshl.* [Technology in the electronics industry], 2007, no. 3, pp. 82–88 (in Russ.).
- [15] Volkov I.V. Out-of-stand speckle holography. Holographic- and speckle -interferometry application in the measurement of natural designs deformations. *Komp'uternaiia opt.* [Computer-based opt.], 2010, vol. 34, no. 1, pp. 82–89 (in Russ.).
- [16] Riabukho V.P. Speckle interferometry. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal* [Soros educ. journal], 2001, vol. 7, no. 5, pp. 1–9 (in Russ.).
- [17] Storozhev M.V., Popov E.A. Teoriia obrabotki metallov davleniem [The theory of plastic metal working]. Moscow, Mashinostronie Publ., 1977, 423 p.
- [18] Tomsen E., Iang Ch., Kobaiashi Sh. Mechanics of plastic deformation in metal processing. THE MACMILLAN Co., NY Collier – MACMILLAN Ltd, London, 1965, 591 p. (Russ. ed.: Mekhanika plasticheskikh deformatsii pri obrabotke metallov. Moscow, Mashinostronie Publ., 1969. 504 p.)
- [19] Vorontsov A.L., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Iu. Development of the new cutting theory. *Vestn. mashinostr.* [Russ. Eng. Res.], 2008, no. 4, pp. 69–74 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 21.05.2013

A.B. Филиппов — сотрудник Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета.
Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета, 652000, Российская Федерация, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, д. 26.

A.V. Filippov works at Yurginskii Technological Institute (Branch) of National Research Tomsk Polytechnic University, Leningradskaya ul. 26, Yurga, Kemerovo region, 652055 Russian Federation.

A.B. Проскоков — сотрудник Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета.
Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета, 652000, Российская Федерация, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, д. 26.

A.V. Proskokov works at Yurginskii Technological Institute (Branch) of National Research Tomsk Polytechnic University, Leningradskaya ul. 26, Yurga, Kemerovo region, 652055 Russian Federation.