



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Исследование напряженно-деформированного и температурного состояния режущей части инструмента с использованием лазерной интерферометрии

Игорь Ефимович^{a, *}, Иван Золотухин^b

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского 38, г. Тюмень, 625000, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-9060-4988>,  egor_kosin@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0002-1517-9117>,  zolutuhinis@tyuiu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91.01-02 + 531.7.08 + 620.172.21

История статьи:

Поступила: 13 сентября 2021
 Рецензирование: 28 сентября 2021
 Принята к печати: 09 ноября 2021
 Доступно онлайн: 15 декабря 2021

Ключевые слова:

Резание металлов
 Металлорежущий инструмент
 Измерение деформаций
 Лазерная интерферометрия
 Скоростная видеосъемка
 Напряженно-деформированное состояние
 Распределение напряжений
 Распределение температур
 Температурное поле
 Граничные условия
 Численные методы

АННОТАЦИЯ

Введение. Эффективность эксплуатации металлообрабатывающих инструментов во многом обусловлена работоспособностью их режущей части, повысить которую можно путем исследования ее напряженно-деформированного (НДС) и температурного состояния. Известные методы исследований НДС либо обладают низкой точностью, либо неприменимы для исследования в процессе работы инструментов, изготовленных из материалов, обладающих высокими механическими характеристиками. В свою очередь, исследование температурных полей с использованием известных методов вызывает большие трудности из-за малого размера рабочей зоны инструментов, высоких температур и большого температурного градиента, возникающих в процессе их работы. **Цель работы:** разработка новых экспериментальных методов исследования НДС и температурных полей режущего инструмента в процессе его работы с использованием лазерной интерферометрии. **Методы** включают в себя: получение интерференционных картин с помощью интерферометра оригинальной конструкции; регистрацию в процессе работы инструмента изменения полей поперечных деформаций его режущей части по соответствующим интерференционным картинкам, полученным с помощью высокоскоростной видеосъемки; расшифровку картин с разделением полей деформаций, вызванных нагревом и контактными нагрузками; расчет полей температур и составляющих напряжений с использованием механических характеристик и температурного коэффициента линейного расширения инструментального материала. Преимущества разработанных методов: применимость при реальных условиях эксплуатации инструмента, возможность исследования нестационарных НДС и температур в процессе работы, высокое пространственное разрешение и малая предельная площадь исследуемой поверхности. **Результаты и обсуждение.** Экспериментальное исследование подтвердило работоспособность методов. Получены поля составляющих напряжений и температур при свободном точении заготовки из жаропрочной стали резцом из твердого сплава ВК8. Разработанные методы могут быть использованы при изучении работоспособности режущей части инструментов в условиях, приближенных к реальным, а также для получения граничных условий при исследовании НДС материала заготовки в зоне обработки.

Для цитирования: Ефимович И.А., Золотухин И.С. Исследование напряженно-деформированного и температурного состояния режущей части инструмента с использованием лазерной интерферометрии // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 79–92. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-79-92.

Введение

Работоспособность режущих инструментов во многом обуславливает экономическую эффективность осуществляемых ими технологических операций. Найти пути повышения работоспособности позволит исследование напряженно-деформированного (НДС) и температурного со-

стояния рабочей части инструмента в условиях, максимально приближенных к реальным.

Известно большое количество разнообразных методов исследования НДС твердых тел, каждый из которых обладает особенностями, ограничивающими возможность их применения к задаче исследования НДС рабочей части инструментов. Например, использование тензометров для исследования полей деформаций весьма затруднено в случае малых размеров исследуемой зоны и высокой температуры ее нагрева. Метод разрезного (составного) резца [1] позволяет проводить исследования в реальных

*Адрес для переписки

Ефимович Игорь Аркадьевич, к.т.н., доцент
 Тюменский индустриальный университет,
 ул. Володарского, 38,
 625000, г. Тюмень, Россия
 Тел.: +7 (3452) 50-49-15, e-mail: egor_kosin@mail.ru

условиях работы, однако особенности конструкции реза [2] искажают получаемые результаты.

Метод с нанесением тензочувствительных покрытий на исследуемый объект непригоден для регистрации динамических деформаций, имеет значительные погрешности измерений и может быть использован только для качественного анализа.

Применение метода сеток [3] затруднено для высокопрочных инструментальных материалов из-за сложности определения изменений межузловых расстояний сетки, обусловленной малой деформацией этих материалов. Бесконтактный зеркально-оптический метод, использующий эффект искажения отраженных от деформируемого тела линий сетки обладает достаточной чувствительностью лишь при измерении деформаций изгиба. Метод муаровых полос весьма трудоемок в связи со сложностью получения и использования растров. Цифровая корреляция изображений [4] дает возможность автоматизировать процесс анализа результатов, но из-за относительно низкой чувствительности метода его можно использовать только для исследования деформации обрабатываемого материала.

Поляризационно-оптический метод [5] не позволяет проводить эксперименты с реальными инструментальными материалами, а из-за малой теплостойкости оптически активных материалов он может быть применен только на микроскоростях при обработке мягких материалов. Метод фотоупругих покрытий частично решает эти проблемы, однако отслаивание покрытий в зонах с высоким градиентом деформаций приводит к увеличению погрешностей измерений.

Метод отраженных теневых полос (метод отраженных каустик) [6] отличается трудоемкостью расшифровки получаемых изображений, особенно при сложноподвижном состоянии.

Метод голографической интерферометрии [7] обладает высокой чувствительностью и применим к объектам любой формы. При использовании двойной экспозиции точность измерения высокая, но отсутствует возможность регистрации непрерывных динамических процессов. При реализации метода реального времени необходима изоляция исследуемого объекта от посторонних вибраций.

Метод электронной цифровой спекл-интерферометрии [8] позволяет измерять дефор-

мации не только в направлении, нормальном к поверхности исследуемого объекта, но и в его плоскости [9]. Однако при этом разрешающая способность и минимальные размеры исследуемой поверхности значительно ограничены.

Методом лазерной интерферометрии возможна регистрация полей деформаций и напряжений, имеющих высокий градиент не только на прозрачных моделях, но и на реальных объектах. Недостатками метода являются сложность регистрации быстроизменяющихся интерференционных картин при исследовании динамических процессов и проблемы, возникающие при их расшифровке. Общим преимуществом оптических методов является бесконтактность, высокая чувствительность и безынерционность процесса измерений.

В исследованиях температурного состояния рабочей части инструмента наибольшее распространение получили контактные методы с использованием различного типа термопар. Однако с помощью искусственной термопары затруднительно измерять температуры в непосредственной близости от зоны контакта обрабатываемого материала с инструментом. Перерезаемые или «бегущие» термопары [10] можно применять лишь для определения характера распределения температур на поверхности инструмента на малых скоростях обработки. Метод полуприкусственной термопары трудоемок, а использование съемного инструмента искажает температурное поле [11]. Естественная термопара применима лишь для проводящих материалов, позволяет определять только среднее значение температуры в зоне обработки, требует предварительной тарировки и имеет низкую точность. Применение пленочных микропреобразователей на основе термометров сопротивления [12] не решает проблемы получения поля температур из-за трудности расположения большого количества датчиков на инструменте.

Методы, использующие эффект появления окисных пленок в воздушной среде (цветов побежалости) и необратимых изменений структуры материала, в том числе микротвердости, позволяют регистрировать только максимальную температуру, которая возникла в процессе эксперимента. Кроме того, изменения микроструктуры при нагреве широко используемых инструментальных твердых сплавов проявляются

незначительно. Методы термочувствительных покрытий (PVD-пленки [10] и термокраски [13]) из-за различий термофизических характеристик материала покрытий и материала исследуемого объекта, а также процессов теплопередачи между ними обладают высокой инертностью и низкой точностью измерения полей температур.

Точность методов, основанных на инфракрасной термометрии (тепловидении), во многом зависит от точности определяемого экспериментально коэффициента излучения исследуемой поверхности, который может изменяться с ростом температуры, зависит от шероховатости и степени окисления поверхности [14]. Проблема определения и учета изменения при нагреве коэффициента излучения может быть частично решена применением двухцветной термометрии [15], однако остается влияние на точность измерений качества поверхности и степени ее окисления. Из-за интерференции на окисных пленках исследуемой поверхности возникает ложный дрейф измеряемой температуры. Инфракрасная камера имеет относительно малое пространственное разрешение из-за большой длины волны теплового излучения, что затрудняет исследование малых объектов. Имеются также затруднения при измерении температуры, изменяющейся в широком диапазоне. Высокая стоимость матриц детекторов инфракрасного излучения и элементов инфракрасной оптики обуславливает ограниченность применения метода.

Метод, основанный на регистрации температурных деформаций исследуемого тела интерферометрическим способом [16], обладает малой инертностью, высоким пространственным разрешением и малой предельной площадью исследуемой поверхности. Кроме того, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), необходимый для преобразования деформаций в температуру, может быть определен с высокой точностью на современных дилатометрах [17] и не зависит от величины шероховатости поверхности. Недостатком метода является проблема разделения силовых и температурных деформаций при их совместном действии, а также ограничения, связанные с формой поверхности исследуемых объектов.

Постановка проблемы. В настоящее время для определения НДС и температурных полей инструментов большое распространение полу-

чили расчетные аналитические [18, 19] и численные [20] методы. В этих методах используют схематизированные силовые и тепловые нагрузки на инструмент [21, 22], полученные, как правило, аналитическим путем, а контактные процессы в зоне обработки во многом упрощаются. Повышение достоверности результатов расчетов может быть достигнуто на основе исследования контурных условий, полученных экспериментальным путем.

Рассмотренные экспериментальные методы исследований НДС и температур обладают существенными недостатками, ограничивающими их применимость и точность полученных результатов. Поэтому разработка новых экспериментальных методов исследований явлений, наблюдаемых при работе различных видов инструментов, является актуальной научной задачей.

Методика исследований

Для преодоления недостатков существующих экспериментальных методов, а также с целью максимального приближения условий эксперимента к реальным авторами разработаны новые экспериментальные методы исследований деформаций [23], температурных полей [24] и лазерно-интерферометрическая установка [25], реализующая эти методы.

Схема разработанной экспериментальной установки представлена на рис. 1. Обрабатываемый материал в форме диска 1 закреплен на вращающейся оправке 2. Исследуемый инструмент 3, установленный в державке 4, перемещается вместе с оптической частью установки в радиальном направлении с необходимой скоростью подачи S . Для получения интерференционной картины используется интерферометр, образованный полированной поверхностью 5 инструмента и оптическим клином 6, также закрепленном на державке. Источником света является лазер 7, для увеличения апертуры пучка которого применен расширитель пучка 8. Исходная поляризация луча лазера горизонтальная и он без потерь проходит через поляризованный светоделитель 9. Пройдя через четвертьволновую пластинку 10, луч меняет поляризацию на круговую с вращением против часовой стрелки. В интерферометре луч делится на рабочий и

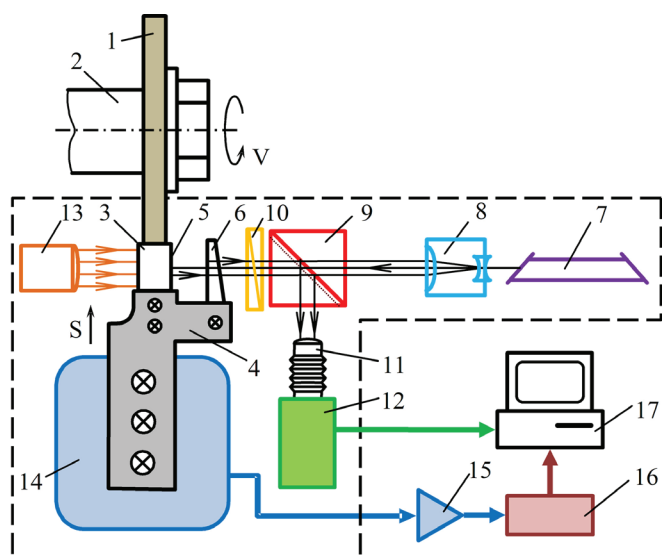


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental rig

эталонный пучок. Эталонный пучок получается в результате отражения части исходного луча от поверхности оптического клина, обращенной к инструменту. Пройдя через оптический клин часть луча образует рабочий пучок, который освещает боковую полированную поверхность инструмента. После отражения обоих пучков их векторы поляризации получают вращение по часовой стрелке, а встретившись снова в оптическом клине, они интерферируют. Итоговый луч благодаря смене направления вращения вектора поляризации после повторного прохождения волновой пластинки приобретает вертикальную поляризацию и отражается от наклонной поверхности светоделителя в сторону объектива 11 камеры 12. С целью определения контура инструмента и обрабатываемого материала используется коллимированный источник подсветки 13. Для регистрации составляющих сил, возникающих при взаимодействии инструмента с обрабатываемым материалом, применен многокомпонентный динамометр 14 с тензоусилителем 15 и аналого-цифровым преобразователем 16. Запись видеоизображения и результатов динамометрии осуществляется в память компьютера 17.

Благодаря применению поляризованного светоделителя в виде кубика, а также четверть-волновой пластинки удалось минимизировать паразитные отражения лазерного луча, что практически устранило эффект муара и значительно снизило потери светового потока. За счет этого

значительно повысилось необходимое при скоростной съемке с малой выдержкой качество изображения регистрируемых интерференционных картин.

Экспериментальная установка смонтирована на модернизированном токарно-винторезном станке модели 163 (рис. 2). Для вращения шпинделя используется комплектный тиристорный привод главного движения КЕМТОК, что обеспечивает бесступенчатую регулировку скорости главного движения. На салазках суппорта установлена базовая плита, на которой закреплены динамометр УДМ-600 1 с державкой, два одноканальных тензоусилителя RDP 628 2 и две направляющие из станочного алюминиевого профиля. На одной направляющей установлен одномодовый одночастотный DPSS лазер LCM-S-111 3 с длиной волны 532 нм, расширитель пучка 4, а также регулируемые держатели светоделителя 5 и волновой пластинки 6 нулевого порядка. На второй направляющей установлена скоростная цифровая видеокамера Fastec HiSpec 2-HR 7 с zoom-объективом NAVITAR Zoom 6000 8. Оптический клин 9 закреплен на державке в регулируемой оправе. Все элементы оптической схемы имеют просветляющие покрытия, а конструкция державки оптимизирована для обеспечения хороших динамических характеристик динамометра. В текущем варианте реализации предлагаемые методы исследования применимы только для резания без использования смазочно-охлаждающих жидкостей.

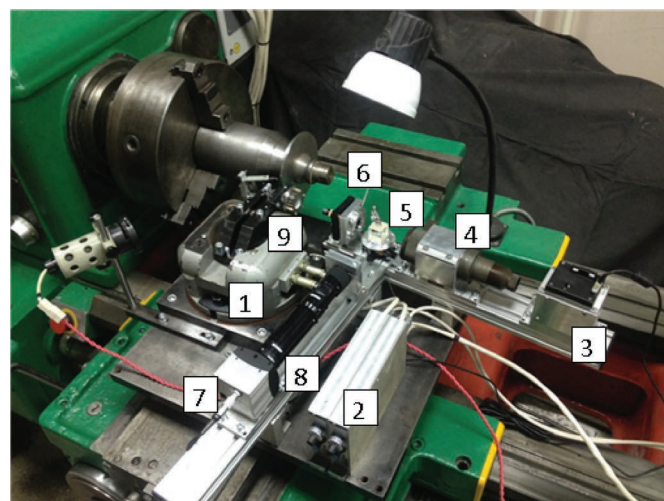


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки на токарном станке

Fig. 2. View of the experimental rig on a lathe

Получаемые на экспериментальной установке интерференционные картины несут информацию об изменениях $\Delta t_{\text{и}}$ ширины $t_{\text{и}}$ рабочей части инструмента:

$$\Delta t_{\text{и}} = \frac{1}{n} m \lambda, \quad (1)$$

где n – коэффициент преломления воздуха (можно с достаточной точностью принять $n = 1$); m – количество интерференционных полос, переместившихся относительно рассматриваемой точки (разность порядков интерференционных полос); λ – длина волны (для используемого лазера $\lambda = 532$ нм).

В то же время поперечная относительная деформация

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta t_{\text{и}}}{t_{\text{и}}}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получаем

$$\varepsilon_z = \frac{m \lambda}{t_{\text{и}}}. \quad (3)$$

Для нахождения разности порядков интерференционных полос m берутся две интерференционные картины – до нагружения и под нагрузкой, с использованием которых в интересующем сечении (например, вдоль поверхностей рабочей части) строятся соответствующие этим картинам эпюры порядков полос: m_1 и m_2 . Вычитанием построенных эпюр получают эпюру суммарного поля деформаций (силовых и температурных) $m_s = (m_2 - m_1)$. Для получения эпюры только силовых деформаций m_p из эпюры m_s вычитают эпюру тепловых деформаций m_t : $m_p = m_s - m_t$. Эпюра тепловых деформаций m_t может быть получена из интерференционной картины, зарегистрированной сразу после быстрого прекращения работы инструмента.

Из закона Гука:

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y), \quad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; σ_x и σ_y – составляющие нормальных напряжений.

Используя формулу (1) для случая только силового воздействия ($m = m_p$), а также формулы (2) и (4), приняв $(\sigma_x + \sigma_y) = \Theta$, можно получить

уравнение для расчета сумм составляющих напряжений Θ :

$$\Theta = -\frac{E \Delta t_{\text{и}}}{\mu t_{\text{и}}} = -\frac{E m_p \lambda}{\mu t_{\text{и}}}. \quad (5)$$

Таким образом, в результате анализа изменений интерференционных картин можно определить разность порядков полос в интересующей точке рабочей части инструмента и, используя ее, определить суммы Θ составляющих напряжений в этой точке.

Для того чтобы осуществить расчет составляющих напряжений, необходимо предварительно гармонизировать поле сумм Θ , полученных из эксперимента. Гармонизация поля сумм Θ осуществляется путем решения уравнения неразрывности в напряжениях:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) в конечных разностях для квадратной сетки (рис. 3, а) имеет вид

$$\begin{aligned} \Theta_{J+1,N} + \Theta_{J,N+1} + \Theta_{J-1,N} + \\ + \Theta_{J,N-1} - 4 \cdot \Theta_{J,N} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

и для задачи гармонизации оно может быть преобразовано в

$$\begin{aligned} \Theta_{J,N} = \frac{1}{4} (\Theta_{J=1,N} + \Theta_{J,N+1} + \\ + \Theta_{J-1,N} + \Theta_{J,N-1}). \end{aligned} \quad (8)$$

После гармонизации методом итераций поля сумм Θ напряжений до требуемой точности производится расчет составляющих напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} . Наиболее удобным для расчета является расположение сетки с осью x , совмещенной с задней гранью рабочей части в виде клина (рис. 4).

В условиях свободного прямоугольного резания рабочая часть находится в плоском напряженном состоянии, которое должно удовлетворять уравнениям равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0, \quad (10)$$

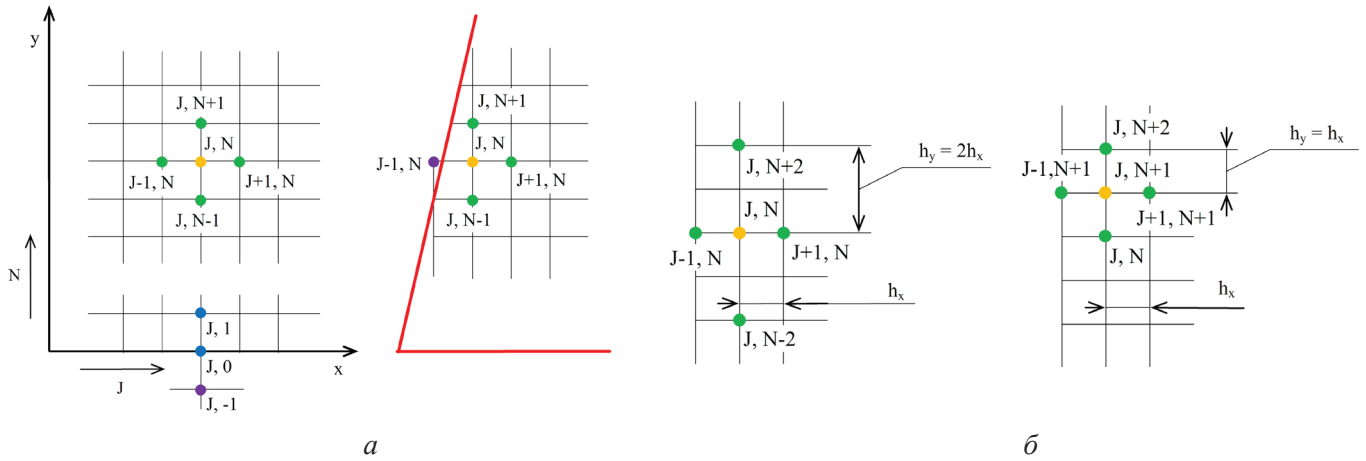


Рис. 3. Схема обозначения узлов квадратной сетки (а) и схема определения крайних точек слоя (б)

Fig. 3. Scheme to number the nodes of the square grid (a) and scheme to end nodes of grid lines (b)

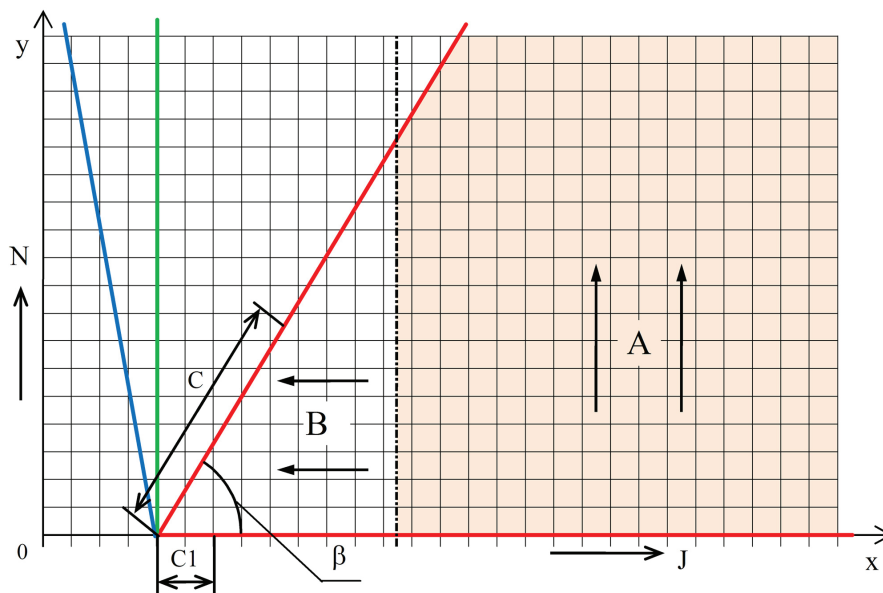


Рис. 4. Схема ориентации расчетной сетки относительно инструмента:
C – длина контакта по передней поверхности; C1 – длина контакта по задней поверхности; β – угол заострения

Fig. 4. Scheme to grid orientation relative to the cutting tool:

C – length of the tool in contact with the chip; C1 – length of the tool in contact with the workpiece; β – lip angle

где X , Y – составляющие объемных сил, действующих в теле инструмента.

Так как на инструмент действуют только внешние силы, то объемные силы постоянны или отсутствуют, т. е. можно принять $X = Y = 0$.

С учетом этого продифференцируем уравнение (9) по x , а уравнение (10) по y :

$$\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial} + \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} = 0. \quad (12)$$

Вычитая уравнение (11) из (12), получим:

$$\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2}. \quad (13)$$

Преобразуем последнее уравнение, производя замену $\sigma_x = (\Theta - \sigma_y)$:

$$\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}. \quad (14)$$

Представим уравнение (14) в конечных разностях (положение узлов см. рис. 3, а):

$$\begin{aligned} & \sigma_{yJ+1,N} + \sigma_{yJ,N+1} + \\ & + \sigma_{yJ-1,N} + \sigma_{yJ,N-1} - 4\sigma_{yJ,N} = \\ & = \Theta_{J+1,N} - 2\Theta_{J,N} + \Theta_{J-1,N}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для экстраполяции (при послойном разделении сумм напряжений) полученное уравнение (15) необходимо преобразовать относительно членов $\sigma_{yJ,N+1}$, $\sigma_{yJ+1,N}$, $\sigma_{yJ-1,N}$, $\sigma_{yJ,N-1}$, для гармонизации – относительно члена $\sigma_{yJ,N}$. В зоне *A* расчет ведется от контура в тело (см. рис.4), причем для вычислений $\sigma_{yJ,N+1}$ уравнение (15) используется для слоев с $N=2$ и более.

Для расчета $\sigma_{yJ,1}$ в слое $N=1$ распишем в конечных разностях для точки $(J,0)$ уравнения (10) и (15). В результате их преобразования с учетом того, что значения σ_y и τ_{xy} на свободном контуре равны нулю, получаем уравнение

$$\sigma_{yJ,1} = \frac{1}{2}(\Theta_{J+1,0} - 2\Theta_{J,0} + \Theta_{J-1,0}). \quad (16)$$

Для нахождения значений σ_y на краях расчетного слоя представим уравнение (15) в конечных разностях с удвоенным шагом по оси *y*, т. е. заменив $h_y = 2 \times h_x$ (рис. 3, б, слева), и разрешим относительно члена $\sigma_{yJ,N+2}$:

$$\begin{aligned} \sigma_{yJ,N+2} &= 4(\Theta_{J+1,N} - 2\Theta_{J,N} + \Theta_{J-1,N}) + \\ &+ 10\sigma_{yJ,N} - 4(\sigma_{yJ+1,N} + \sigma_{yJ-1,N}) - \\ &- \sigma_{yJ,N-2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Определив значение $\sigma_{yJ,N+2}$, можно найти $\sigma_{yJ-1,N+1}$ и $\sigma_{yJ+1,N+1}$ на краях слоя $N+1$ (рис. 3, б, справа), преобразовав относительно центральной точки $(J,N+1)$ формулу (15).

Для зоны *B* (см. рис. 4) расчет осуществляется аналогично с учетом изменения направления движения, т. е. вместо слоев *N* зоны *A* рассматриваются слои *J*.

Составляющая σ_x нормальных напряжений в каждом узле определяется по формуле

$$\sigma_x = \Theta - \sigma_y. \quad (18)$$

Тангенциальная τ_{xy} , составляющая напряжений может быть определена из уравнений равновесия (11) и (12), если их расписать в конечных разностях. В зоне *A*

$$\begin{aligned} \tau_{xyJ,N+1} &= \tau_{xyJ,N-1} + \\ &+ \tau_{xJ+1,N} - \tau_{xJ-1,N} \end{aligned} \quad (19)$$

и в зоне *B*

$$\begin{aligned} \tau_{xyJ-1,N} &= \tau_{xyJ+1,N} - \\ &- \tau_{yJ,N+1} + \tau_{yJ,N-1}. \end{aligned} \quad (20)$$

Для первого слоя зоны *A* уравнение примет вид

$$\tau_{xyJ,1} = \frac{\sigma_{xJ+1,0} - \sigma_{xJ-1,0}}{2}. \quad (21)$$

Таким образом, используя формулы (15)–(21), можно осуществить разделение сумм напряжений Θ , полученных по результатам анализа изменений интерференционных картин, т. е. рассчитать составляющие напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} .

Для расчета полей температур из эпюры порядков полос m_3 , полученной сразу после вывода инструмента из зоны обработки, вычитают эпюру до нагружения m_1 (т. е. для холодного инструмента). Таким образом, получаем эпюру порядков полос $m_t = (m_3 - m_1)$ для интересующего сечения нагретого инструмента.

При наличии температурных деформаций закон Гука для плоского напряженного состояния с учетом температурных напряжений и формулы (3) можно представить в виде

$$\varepsilon_z = \frac{m_t \lambda}{t_u} = -\frac{\mu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) + \alpha(T_t - T_0), \quad (22)$$

где $(T_t - T_0)$ – изменение температуры от начальной T_0 до достигнутой T_t в интересующий момент работы инструмента; $(\sigma_x + \sigma_y)$ – сумма термонапряжений; α – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) инструментального материала [26].

Термонапряжения согласно результатам различных исследований обычно составляют не более 40 % величины напряжений, возникающих от действия силовых нагрузок в процессе работы инструмента. Если принять $(\sigma_x + \sigma_y) = 0$, то при черновом точении стали (например, при $T_t = 740$ К для сплава ВК8 с $\alpha = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$,

$E = 596$ ГПа, $\mu = 0,32$ и максимальным значением сумм напряжений в режущем клине ($\Theta = 1600$ МПа) составляющая деформации, вызванная термонапряжениями, не превысит 14 % от общей деформации инструмента. Поэтому температуры в узлах расчетной сетки с точностью, достаточной для инженерных расчетов, можно определить по формуле, полученной из уравнения (22):

$$T_t = \frac{m_t \lambda}{t_n \alpha} + T_0. \quad (23)$$

Предложенные методики реализованы в программах расчета составляющих напряжений и температур, написанных в среде MatLab.

Результаты и их обсуждение

Для исследования работоспособности методов проведен эксперимент, в котором осуществлялся процесс прямоугольного точения стали 1Х12Н2ВМФ (ЭИ961) резцом из твердого сплава ВК8 с задним углом $\alpha = 10$ град., передним углом $\gamma = -5$ град. со скоростью резания $V = 0,1$ м/с и подачей $S = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м/об. Интерференционные картины, полученные видеосъемкой с частотой $16 \cdot 10^3$ кадр/с, при данных условиях представлены на рис. 5.

На рис. 6 представлены эпюры порядков интерференционных полос m вдоль передней и задней поверхности инструмента (в зависимости от расстояния R от вершины рабочей части).

На рис. 7 представлены поля составляющих напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} и поле температур, полученные с использованием разработанных методик.

Анализ поля составляющей σ_x показывает, что в основном преобладают напряжения сжатия, максимальные значения которых наблюдаются на передней поверхности вблизи режущей кромки. Изменение составляющей σ_y вдоль передней поверхности имеет экстремальный характер с минимумом в зоне контакта. По мере приближения к режущей кромке составляющая σ_y увеличивается и меняет знак. Изменение касательной составляющей τ_{xy} на передней поверхности также имеет экстремальный характер. По мере приближения к режущей кромке составляющая τ_{xy} сначала уменьшается до минимального

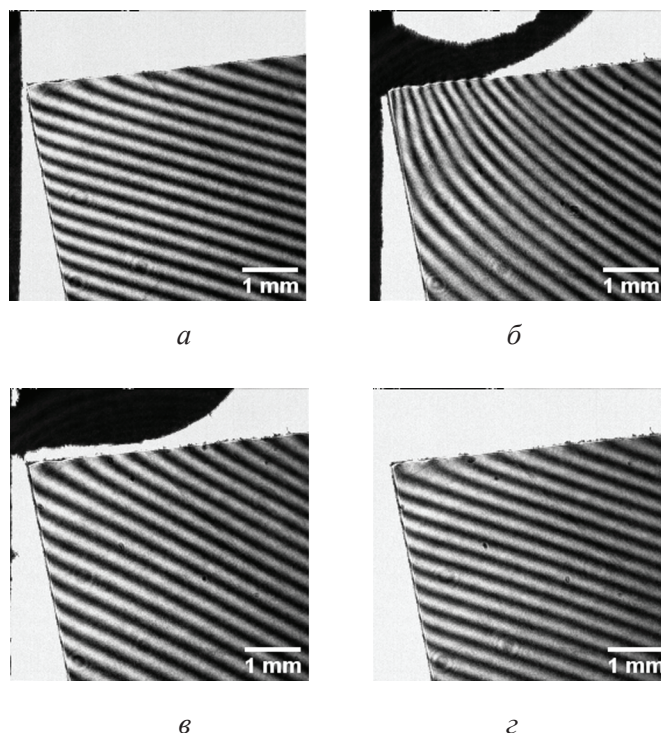


Рис. 5. Интерференционные картины (частота съемки $16 \cdot 10^3$ кадр/с):

a – до момента врезания; *б* – во время процесса резания (максимальная нагрузка); *в* – сразу после работы; *г* – через 1 с после работы

Fig. 5. Interference fringe patterns (camera frame rate $16 \cdot 10^3$ fps):

a – before the cutting process; *б* – during the cutting process (maximum load); *в* – immediately after the interruption of the process; *г* – one second after the interruption of the process

отрицательного значения, а затем увеличивается и меняет знак. В зоне контакта на задней поверхности наблюдается узкая зона отрицательных значений τ_{xy} , а вне длины контакта составляющая $\tau_{xy} = 0$.

Температурное поле отличается равномерностью. Значения температур относительно низкие из-за высокой теплопроводности твердого сплава марки ВК8 и небольшой скорости резания. Максимальная температура наблюдается на вершине резца. По мере удаления от нее температура уменьшается, при этом больший градиент наблюдается по передней поверхности.

Характер распределения температур и напряжений, полученных в результате проверки работоспособности разработанных методов, совпадает с результатами, полученными альтернативными методами в других исследованиях [1, 14].

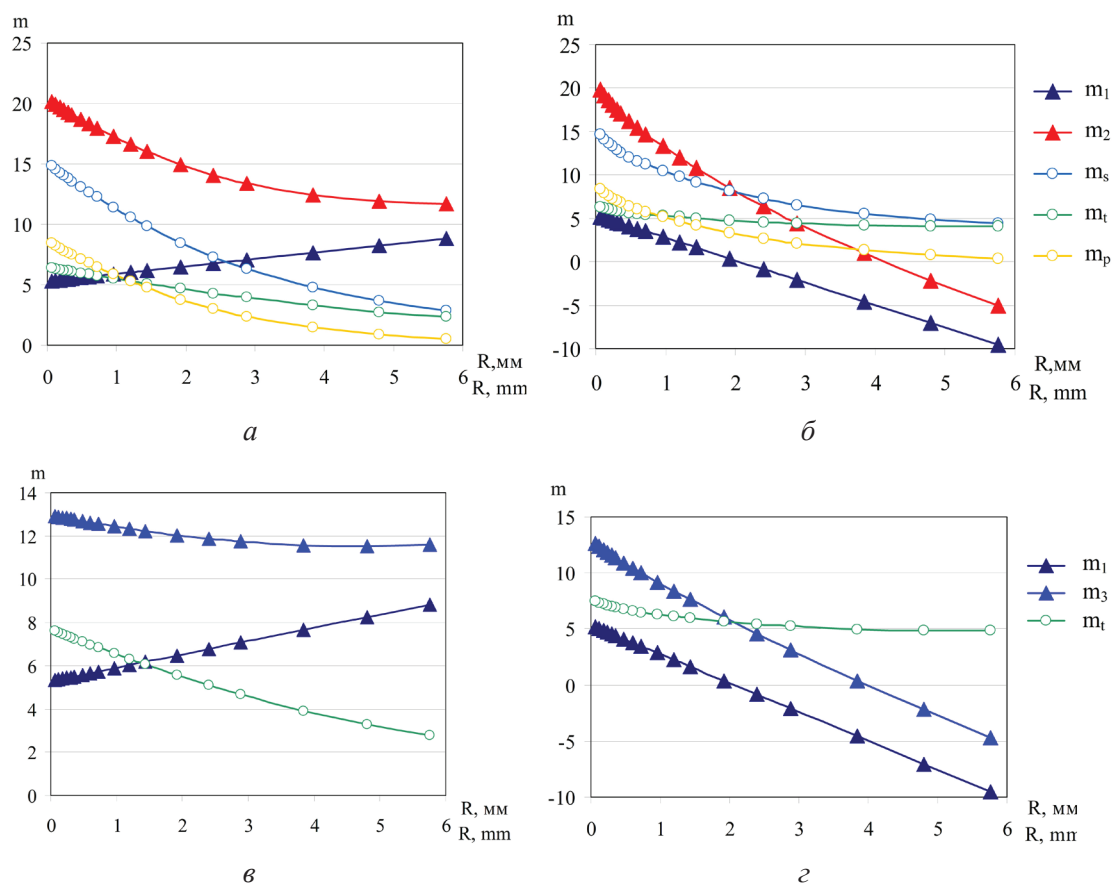


Рис. 6. Эпюры порядков полос во время процесса резания вдоль передней (а) и задней (б) поверхности; после вывода инструмента из зоны обработки вдоль передней (в) и задней (г) поверхности

Fig. 6. Fringe order distributions during the cutting process for the rake (a) and clearance (б) faces; immediately after the interruption of the process for the rake (в) and clearance (г) faces

Выводы

Разработаны новые экспериментальные методы исследований деформаций и температурных полей на базе лазерной интерферометрии, которые позволяют проводить эксперименты с реальными обрабатываемыми и инструментальными материалами в реальных условиях динамического процесса обработки.

В отличие от инфракрасной термометрии разработанный метод исследования полей температур, благодаря использованию света в видимом диапазоне спектра, обладает большим пространственным разрешением и значительно меньшей предельной площадью исследуемой поверхности. Кроме того, метод более достоверен из-за отсутствия интерференции коротковолнового излучения на окисных пленках и благодаря использованию ТКЛР для расчета температур, который в отличие от коэффициента излучения не зависит от качества

поверхности и может быть измерен с высокой точностью на современных дилатометрах.

Благодаря специальной конструкции интерферометра, использующей жестко закрепленный на державке оптический клин, удалось минимизировать отрицательное влияние вибраций – главного источника погрешностей интерферометрических методов исследований. Кроме того, применение поляризованных компонентов в оптической схеме снизило потери светового потока и значительно повысило качество регистрируемых интерференционных картин, что очень важно при скоростной видеосъемке со сверхмалой выдержкой.

Работоспособность разработанных интерферометрических методов экспериментально подтверждена при обработке высоколегированной стали 1Х12Н2ВМФ (ЭИ961) резцом из твердого сплава ВК8 с отрицательным передним углом 5° , получены поля составляющих напряжений и температур в рабочей части инструмента.

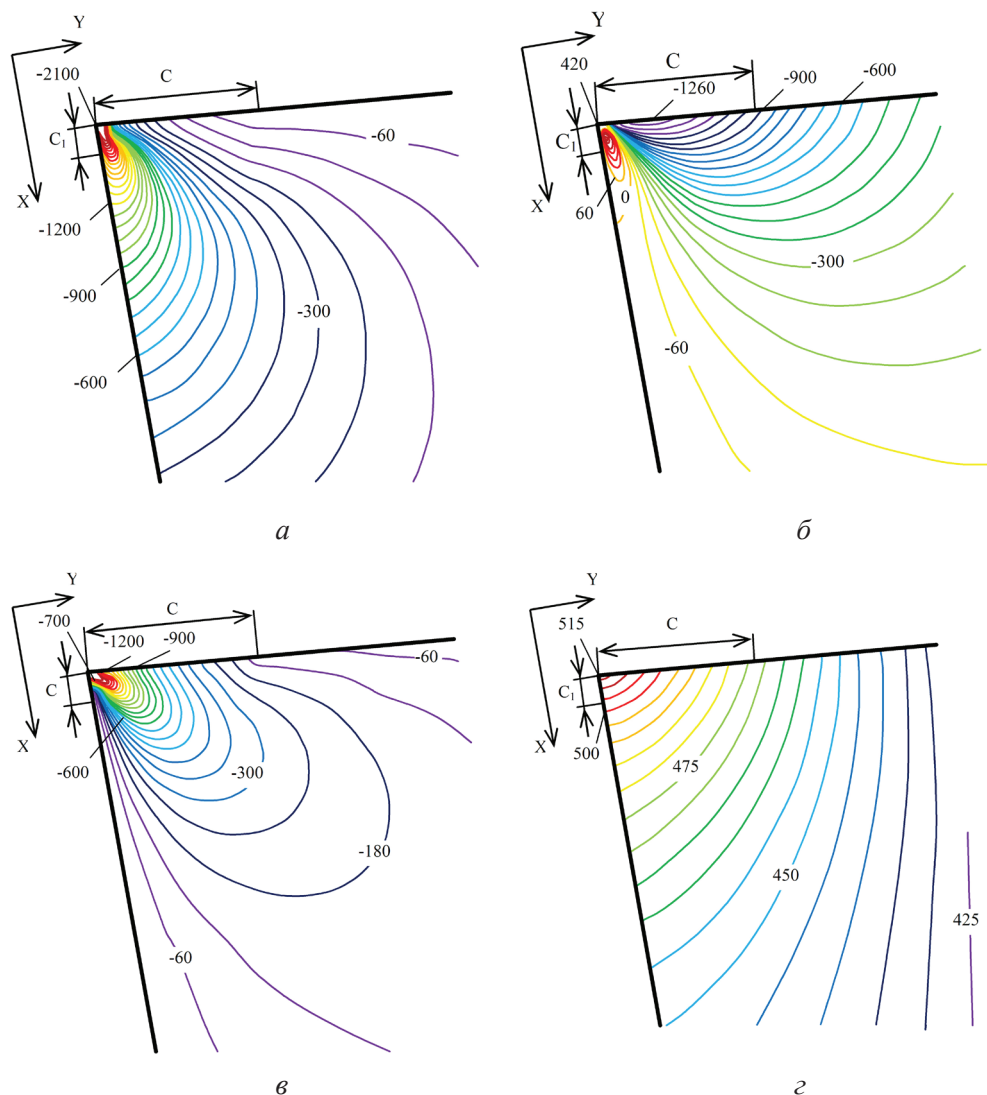


Рис. 7. Поля изолиний составляющих напряжений σ_x (а), σ_y (б) и τ_{xy} (в) в МПа и температурное поле (г) в К

Fig. 7. Distribution of stress components σ_x (а), σ_y (б), and τ_{xy} (в) in MPa and the temperature field (г) in K

Список литературы

1. Buryta D., Sowerby R., Yellowley I. Stress distributions on the rake face during orthogonal machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1994. – Vol. 34, iss. 5. – P. 721–739. – DOI: 10.1016/0890-6955(94)90054-X.
2. Laakso S.V.A., Bushlya V., Ståhl J.-E. The correct way of splitting tools – Optimization of instrument design for measuring contact stress distribution // Procedia Manufacturing. – 2018. – Vol. 25. – P. 97–102. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.06.062.
3. Grédiac M., Sur F., Blaysat B. The grid method for in-plane displacement and strain measurement: a review and analysis // Strain. – 2016. – Vol. 52, iss. 3. – P. 205–243. – DOI: 10.1111/str.12182.
4. Stress field analysis in orthogonal cutting process using digital image correlation technique / Z. Dong,

- X.-M. Zhang, W.-J. Xu, H. Ding // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2017. – Vol. 139. – P. 031001. – DOI: 10.1115/1.4033928.
5. Ramesh K., Sasikumar S. Digital photoelasticity: recent developments and diverse applications // Optics and Lasers in Engineering. – 2020. – Vol. 135. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106186.
6. Isogimi K., Kitagawa T., Kurita H. Fundamental research of stress analysis in cutting tool by means of caustics method // Journal of the Japan Society for Precision Engineering. – 1988. – Vol. 54, iss. 2. – P. 390–395. – DOI: 10.2493/jjspe.54.390.
7. DHI contemporary methodologies: a review and frontiers / J.M. Flores-Moreno, M.D.L. Torre-Ibarra, M.D.S. Hernandez-Montes, F.M. Santoyo // Optics and Lasers in Engineering. – 2020. – Vol. 135. – P. 106184. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106184.

8. Laser speckle based digital optical methods in structural mechanics: a review / I.M. De la Torre, M.D.S. Hernandez-Montes, J.M. Flores-Moreno, F.M. Santoyo // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2016. – Vol. 87. – P. 32–58. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.02.008.

9. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 240 с. – ISBN 5-7038-2731-4.

10. Longbottom J.M., Lanham J.D. Cutting temperature measurement while machining – a review // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. – 2005. – Vol. 77, iss. 2. – P. 122–130. – DOI: 10.1108/00022660510585956.

11. Komanduri R.A., Hou Z.B. Review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology // *Tribology International*. – 2001. – Vol. 34. – P. 653–682. – DOI: 10.1016/S0301-679X(01)00068-8.

12. Yoshioka H., Hashizume H., Shinno H. In-process microsensor for ultraprecision machining // *IEEE Proceedings – Science Measurement and Technology*. – 2004. – Vol. 151, N 2. – DOI: 10.1049/ip-smt:20040375.

13. On the measurement of temperature in material removal processes / M.A. Davies, T. Ueda, R. M'Saoubi, B. Mullany, A.L. Cooke // *CIRP Annals*. – 2007. – Vol. 56, iss. 2. – P. 581–604. – DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.009.

14. Radiation thermometry applied to temperature measurement in the cutting process / J. Pujana, L. del Campo, R.B. Pérez-Sáez, M.J. Tello, I. Gallego, P.J. Arrazola // *Measurement Science and Technology*. – 2007. – Vol. 18, N 11. – P. 3409–3416. – DOI: 10.1088/0957-0233/18/11/022.

15. A calibrated dual-wavelength infrared thermometry approach with non-greybody compensation for machining temperature measurements / A. Hijazi, S. Sachidanandan, R. Singh, V. Madhavan // *Measurement Science and Technology*. – 2011. – Vol. 22, N 2. – P. 1–13. – DOI: 10.1088/0957-0233/22/2/025106.

16. Magunov A.N. Laser thermometry of solids. – Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2006. – 240 p. – ISBN 978-1-904602-12-5.

17. A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures / J.D. James, J.A. Spittle, S.G.R. Brown, R.W. Evans // *Measurement Science and Technology*. – 2001. – Vol. 12. – P. R1–R15. – DOI: 10.1088/0957-0233/12/3/201.

18. Goryainov V.V., Popov M.I., Chernyshov A.D. Solving the stress problem in a sharp wedge-shaped cutting tool using the quick decomposition method and the problem of matching boundary conditions // *Mechanics of Solids*. – 2019. – Vol. 54, N 7. – P. 1083–1097. – DOI: 10.3103/S0025654419070094.

19. Analytical model of temperature distribution in metal cutting based on potential theory / F. Klocke, M. Brockmann, S. Gierlings, D. Veselovac // *Mechanical Sciences*. – 2015. – Vol. 6. – P. 89–94. – DOI: 10.5194/ms-6-89-2015.

20. Recent advances in modelling of metal machining processes / P.J. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davies, I.S. Jawahir // *CIRP Annals*. – 2013. – Vol. 62, iss. 2. – P. 695–718. – DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.006.

21. Безъязычный В.Ф., Счепек М. Развитие исследований тепловых процессов в технологии машиностроения // *Записки горного института*. – 2018. – Т. 232. – С. 395–400. – DOI: 10.31897/PMI.2018.4.395.

22. Mathematical modelling of cutting process system / J.J. Olt, A.A. Liivapuu, O.O. Liivapuu, V.V. Maksarov, T.T. Tärkla // *Engineering Mathematics I*. – Cham: Springer, 2016. – P. 173–186. – (Springer Proceedings in Mathematics and Statistics; vol. 178). – DOI: 10.1007/978-3-319-42082-0_11.

23. Патент 2436039 Российская Федерация, МПК G 01 B 11/16 (2006.01). Способ исследования деформации режущего инструмента в процессе резания / И.А. Ефимович, Е.И. Швецова. – № 2010134541/28; заявл. 18.08.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34.

24. Патент 2442967 Российская Федерация, МПК G 01 K 5/48, B 23 Q 11/00 (2006.01). Способ определения температурных полей в режущей части инструмента в процессе резания / И.А. Ефимович, И.С. Золотухин, Е.И. Швецова. – № 2010134543/28; заявл. 18.08.10; опубл. 20.02.12, Бюл. № 5.

25. Патент 151653 Российская Федерация, МПК G 01 B 11/16 (2006.01). Интерферометрическая установка / И.А. Ефимович, И.С. Золотухин, В.И. Ефимович. – № 2014138554/28, заявл. 23.09.2014; опубл. 10.04.15, Бюл. № 10.

26. Ефимович И.А., Золотухин И.С., Завьялов Е.С. Температурный коэффициент линейного расширения вольфрамо-кобальтовых твердых сплавов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 129–140. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-129-140.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Study of the stress-strain and temperature fields in cutting tools using laser interferometry

Igor Efimovich ^{a,*}, Ivan Zolotukhin ^b

Tyumen Industrial University, 38 Volodarskogo, Tyumen, 625000, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-9060-4988>, egor_kosin@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1517-9117>, zolotuhinis@tyuiu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 September 2021

Revised: 28 September 2021

Accepted: 09 November 2021

Available online: 15 December 2021

Keywords:

Metal cutting
 Metal cutting tool
 Strain measurement
 Laser interferometry
 High-speed video recording
 Stress-strain state
 Stress distribution
 Temperature distribution
 Temperature field
 Boundary condition
 Numerical analysis

ABSTRACT

Introduction. The efficiency of the metalworking processes highly depends on the performance of the implemented cutting tools that can be increased by studying its stress-strain state and temperature fields. Existing stress analysis methods either have a low accuracy or are inapplicable for research during the operation of the tools made of materials with high mechanical properties. In addition, the study of temperature fields using known methods is difficult due to the small size of the cutting zone, high temperatures, and a heavy temperature gradient appearing during metal cutting. **The purpose** of this study is to develop new experimental methods for measuring the stress-strain and temperature fields in the cutting tool during its operation using laser interferometry. **The methods** include: obtaining interference fringe patterns using an interferometer with the original design, obtaining the tool deformation field during the cutting process by recording the changes in interference fringe patterns using a high-speed camera, processing fringe patterns with the separation of deformations caused by heating and cutting forces, and calculating temperature fields and stress distributions using mechanical properties and the coefficient of thermal expansion of the tool material. The advantages of the developed methods include: applicability under real operating conditions of the cutting tool, ability to study the non-stationary stress-strain state and temperatures during an operation, and achievement of a high spatial resolution and a small field of view for the investigated surface. **Results and Discussion.** The experimental study confirmed the efficiency of the methods. The results of the study included the fields of stresses and temperatures obtained during the orthogonal cutting of heat-resistant steel with a tool made of cemented tungsten carbide *WC-8Co*. The developed methods can be used to study the cutting tool efficiency at close to real conditions and in obtaining boundary conditions for the study stress-strain state of a workpiece material near the cutting zone.

For citation: Efimovich I.A., Zolotukhin I.S. Study of the stress-strain and temperature fields in cutting tools using laser interferometry. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 79–92. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-79-92. (In Russian).

References

1. Buryta D., Sowerby R., Yellowley I. Stress distributions on the rake face during orthogonal machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1994, vol. 34, iss. 5, pp. 721–739. DOI: 10.1016/0890-6955(94)90054-X.
2. Laakso S.V.A., Bushlya V., Ståhl J.-E. The correct way of splitting tools – Optimization of instrument design for measuring contact stress distribution. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 25, pp. 97–102. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.06.062.
3. Grédiac M., Sur F., Blaysat B. The grid method for in-plane displacement and strain measurement: a review and analysis. *Strain*, 2016, vol. 52, iss. 3, pp. 205–243. DOI: 10.1111/str.12182.

* Corresponding author

Efimovich Igor A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Tyumen Industrial University
 38 Volodarskogo,
 625000, Tyumen, Russian Federation
 Tel.: +7 (3452) 50-49-15, e-mail: egor_kosin@mail.ru

4. Dong Z., Zhang X.-M., Xu W.-J., Ding H. Stress field analysis in orthogonal cutting process using digital image correlation technique. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, vol. 139, p. 031001. DOI: 10.1115/1.4033928.
5. Ramesh K., Sasikumar S. Digital photoelasticity: recent developments and diverse applications. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 135. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106186.
6. Isogimi K., Kitagawa T., Kurita H. Fundamental research of stress analysis in cutting tool by means of caustics method. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1988, vol. 54, iss. 2, pp. 390–395. DOI: 10.2493/jjspe.54.390.
7. Flores-Moreno J.M., Torre-Ibarra M.D.L., Hernandez-Montes M.D.S., Santoyo F.M. DHI contemporary methodologies: a review and frontiers. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 135, p. 106184. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106184.
8. Torre I.M. De la, Hernandez-Montes M.D.S., Flores-Moreno J.M., Santoyo F.M. Laser speckle based digital optical methods in structural mechanics: a review. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, vol. 87, pp. 32–58. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.02.008.
9. Razumovsky I.A. *Interferentsionno-opticheskie metody mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela* [Interference-optical methods of solid mechanics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007. 240 p. ISBN 5-7038-2731-4.
10. Longbottom J.M., Lanham J.D. Cutting temperature measurement while machining – a review. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2005, vol. 77, iss. 2, pp. 122–130. DOI: 10.1108/00022660510585956.
11. Komanduri R.A., Hou Z.B. Review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology. *Tribology International*, 2001, vol. 34, pp. 653–682. DOI: 10.1016/S0301-679X(01)00068-8.
12. Yoshioka H., Hashizume H., Shinno H. In-process microsensor for ultraprecision machining. *IEE Proceedings – Science Measurement and Technology*, 2004, vol. 151, no. 2. DOI: 10.1049/ip-smt:20040375.
13. Davies M.A., Ueda T., M'Saoubi R., Mullan B., Cooke A.L. On the measurement of temperature in material removal processes. *CIRP Annals*, 2007, vol. 56, iss. 2, pp. 581–604. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.009.
14. Pujana J., Campo L. del, Pérez-Sáez R.B., Tello M.J., Gallego I., Arrazola P.J. Radiation thermometry applied to temperature measurement in the cutting process. *Measurement Science and Technology*, 2007, vol. 18, no. 11, pp. 3409–3416. DOI: 10.1088/0957-0233/18/11/022.
15. Hijazi A., Sachidanandan S., Singh R., Madhavan V. A calibrated dual-wavelength infrared thermometry approach with non-greybody compensation for machining temperature measurements. *Measurement Science and Technology*, 2011, vol. 22, no. 2, pp. 1–13. DOI: 10.1088/0957-0233/22/2/025106.
16. Magunov A.N. *Laser thermometry of solids*. Cambridge, Cambridge International Science Publishing, 2006. 240 p. ISBN 978-1-904602-12-5.
17. James J.D., Spittle J.A., Brown S.G.R., Evans R.W. A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures. *Measurement Science and Technology*, 2001, vol. 12, pp. R1–R15. DOI: 10.1088/0957-0233/12/3/201.
18. Goryainov V.V., Popov M.I., Chernyshov A.D. Solving the stress problem in a sharp wedge-whaped cutting tool using the quick decomposition method and the problem of matching boundary conditions. *Mechanics of Solids*, 2019, vol. 54, no. 7, pp. 1083–1097. DOI: 10.3103/S0025654419070094.
19. Klocke F., Brockmann M., Gierlings S., Veselovac D. Analytical model of temperature distribution in metal cutting based on potential theory. *Mechanical Sciences*, 2015, vol. 6, pp. 89–94. DOI: 10.5194/ms-6-89-2015.
20. Arrazola P.J., Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I.S. Recent advances in modelling of metal machining processes. *CIRP Annals*, 2013, vol. 62, iss. 2, pp. 695–718. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.006.
21. Bezyazychnyi V.F., Szczerek M. Thermal processes research development in machine-building technology. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 232, pp. 395–400. DOI: 10.31897/pmi.2018.4.395.
22. Olt J.J., Liivapuu A.A., Liivapuu O.O., Maksarov V.V., Tärkla T.T. Mathematical modelling of cutting process system. *Engineering Mathematics I*. Cham, Springer, 2016, pp. 173–186. DOI: 10.1007/978-3-319-42082-0_11.

23. Efimovich I.A., Shvetsova E.I. *Sposob issledovaniya deformatsii rezhushchego instrumenta v protsesse rezaniya* [Method for study of cutting tool deformation in process of cutting]. Patent RF, no. 2436039, 2010.

24. Efimovich I.A., Zolotukhin I.S., Shvetsova E.I. *Sposob opredeleniya temperaturnykh polei v rezhushchei chasti instrumenta v protsesse rezaniya* [Method for determination of temperature fields in the cutting part of the instrument in process of cutting]. Patent RF, no. 2442967, 2010.

25. Efimovich I.A., Zolotukhin I.S., Efimovich V.I. *Interferometricheskaya ustanovka* [Interferometric rig]. Patent RF, no. 151653, 2014.

26. Efimovich I.A., Zolotukhin I.S., Zav'yalov E.S. Temperaturnyi koeffitsient lineinogo rasshireniya vol'framo-kobal'tovykh tverdykh splavov [Thermal coefficient of linear expansion of tungsten-cobalt cemented carbide]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 129–140. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-129-140.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).