

## СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С РЕГУЛЯРНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ СВОЙСТВ

Ольга Игоревна ИЛЬИНСКАЯ родилась в городе Москве. Доцент «МАТИ» — РГТУ им. К.Э. Циолковского. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы — в области технологии авиастроения. Автор более 20 научных работ. Тел.: (495) 915-56-79.

Olga I. ILYINSKAYA, Ph.D., was born in Moscow. She is an Associate Professor at the Moscow State Aviation Technological University. Her research interests are in manufacturing engineering. She has published over 20 technical papers. Tel.: (495) 915-56-79.

Владимир Николаевич ХАХИН родился в 1949 г. в городе Москве. Доцент «МАТИ» — РГТУ им. К.Э. Циолковского. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы — в области технологии авиастроения. Автор более 45 научных работ. Тел.: (495) 915-56-79.

Vladimir N. KHAKHIN, Ph.D., was born in 1949, in Moscow. He is an Associate Professor at the Moscow State Aviation Technological University. Her research interests are in manufacturing engineering. He has published 45 technical papers. Tel.: (495) 915-56-79.

*Представлены результаты исследования технологических проблем, которые возникают при механической обработке деталей авиационной техники из монокристаллических материалов. Предложены способы управления параметрами качества поверхностного слоя таких деталей.*

*Investigation results are presented as applies to manufacturing problems for a machining of aircraft parts made from single-crystal materials. Quality management techniques are suggested to obtain appropriate surface layer of the manufactured parts.*

**Ключевые слова:** анизотропия, монокристаллические материалы, параметры качества деталей, точность обработки, алмазное выглаживание.

**Key words:** anisotropy, single-crystal material, quality parameters of machine parts, processing accuracy, diamond burnishing.

Основной задачей современного машиностроения является обеспечение точности и повышение качества поверхности деталей в процессе их изготовления. Эти параметры во многом зависят от физико-механических характеристик обрабатываемого материала.

С развитием возможностей современного литейного производства дальнейшее обеспечение работоспособности теплонапряженных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) идет по пути совершенствования структуры жаропрочных сплавов. Применение материалов с направленной и монокристаллической структурой (МНК) позволяет значительно повысить сопротивление деталей длительному статическому и термоциклическому разрушению и малоциклового усталости [1].

Однако важной особенностью таких материалов является анизотропия физических свойств (механических, тепловых, магнитных и т.д.), обусловленная неодинаковой плотностью расположения

атомов в различных плоскостях и направлениях кристаллической решетки.

Проведенные авторами исследования особенности механической обработки образцов из сплава типа ЖС, обладающего регулярной анизотропией физико-механических свойств (рис. 1), показали,

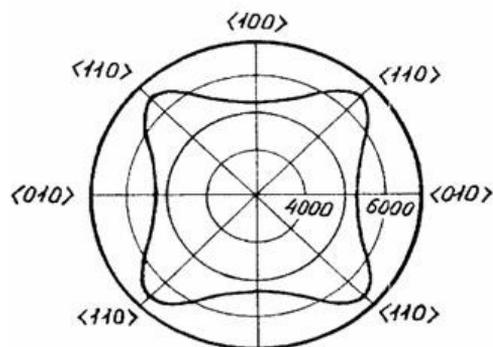


Рис. 1. Диаграмма изменения микротвердости  $H$  (в МПа) по кристаллографическим осям монокристалла

что изменение радиальной составляющей силы резания (рис. 2), отклонение формы детали и шероховатости ее поверхности имеют регулярный характер, обусловленный структурой данного материала. Это затрудняет обеспечение заданной точности и параметров качества поверхностного слоя таких деталей при механической обработке.

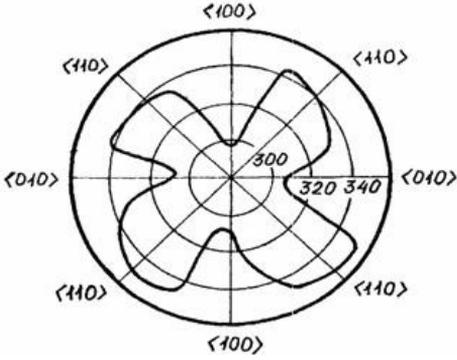


Рис. 2. Диаграмма изменения составляющей силы резания  $P_y$  (кН) по кристаллографическим осям монокристалла

Данное обстоятельство необходимо учитывать при назначении режимов механической обработки: подачи, скорости и глубины резания.

Для повышения точности обработки и обеспечения стабильной шероховатости поверхности деталей из монокристаллических материалов предложены выражения для определения подачи и глубины резания:

$$t = t_0 \cdot \left( 1 + B \cdot \frac{H - H_{\min}}{H_{\min}} \right); \quad (1)$$

$$S = S_0 \cdot A \cdot \left( \frac{H}{H_{\max}} \right); \quad (2)$$

где  $t$  и  $S$  — переменные значения глубины резания (мм) и подачи (мм/об);

$t_0, S_0$  — начальные значения глубины и подачи;  $H$  — переменное значение твердости на диаграмме (МПа);

$H_{\min}, H_{\max}$  — минимальное и максимальное значения твердости (МПа);

$A, B$  — экспериментальные коэффициенты, зависящие от конкретных условий обработки.

Такая обработка с заданным изменением режимов резания возможна на станках с ЧПУ, которые позволяют регулировать значения подачи, глубины, скорости по заранее составленной программе, учитывающей кристаллографическую ориентацию материала детали.

Из рис. 3 видно, что после обработки монокристаллических образцов из сплава ЖС с переменной

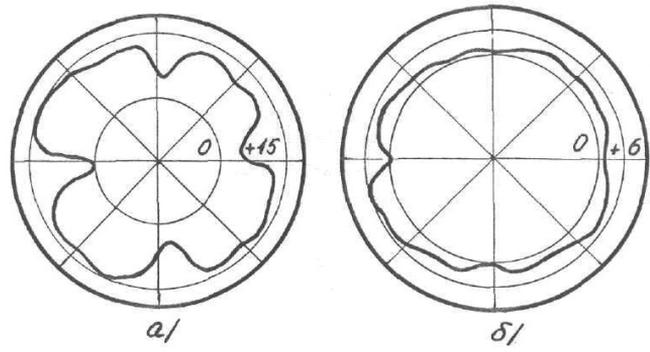


Рис. 3. Диаграммы отклонений формы  $\delta$ , мм, поверхности образца из сплава ЖС, обработанного:  $a$  — с постоянной глубиной резания  $t_0$ ;  $b$  — с переменной глубиной резания  $t$

глубиной резания  $t$ , в соответствии с выражением (1), отклонение формы уменьшилось с 0,015 до 0,006 мм.

Управлять параметрами качества деталей из материалов, обладающих регулярной анизотропией свойств, можно с помощью изменения величины и направления вектора скорости перемещения инструмента. Для практического осуществления такого управления авторами предлагается способ выглаживания деталей, позволяющий изменять такие параметры поверхностного слоя, как шероховатость, микротвердость и остаточные напряжения.

Согласно данному способу, инструмент 1 со сферической рабочей поверхностью устанавливают под углом  $\varphi$  к поверхности детали 2 (рис. 4). Наклон оси инструмента относительно нормали к обрабатываемой поверхности приводит к тому, что его контакт с поверхностью детали осуществляется в точке  $A$ . Точка  $O$  — вершина выглаживающего наконечника.

При вращении инструмента вокруг его оси со скоростью  $\omega$  в контакт с поверхностью детали 2 будут вступать точки поверхности инструмента, лежащие на окружности радиуса  $r$ . Из треугольника

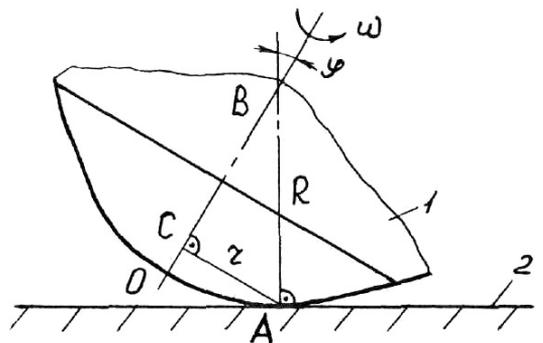


Рис. 4. Схема определения геометрических параметров при выглаживании

$ABC$ , образованного осью инструмента, нормалью к поверхности детали в точке контакта  $A$  и радиусом  $r$ , получаем:

$$r = AC = AB \cdot \sin \varphi = R \cdot \sin \varphi, \quad (3)$$

где  $R$  — радиус сферической части инструмента;  $\varphi$  — угол наклона инструмента относительно нормали к поверхности детали в точке контакта в рассматриваемой плоскости.

Если бы контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью осуществлялся в точке  $O$ , то скорость выглаживания была бы равна скорости поступательного перемещения инструмента  $V_1$  относительно поверхности детали. Так как контакт инструмента с деталью происходит в точке  $A$ , то, помимо скорости поступательного перемещения  $V_1$  инструмента, появляется скорость  $V_2$  от вращения инструмента вокруг своей оси:

$$V_2 = \omega \cdot r. \quad (4)$$

При наклоне инструмента на угол  $\alpha$  (рис. 5) в плоскости, перпендикулярной направлению скорости перемещения инструмента, направление скорости  $V_{2\alpha}$  будет совпадать с направлением скорости  $V_1$  или будет противоположно ему, в зависимости от направления вращения инструмента и наклона угла  $\alpha$ . В этом случае величина скорости выглаживания определяется суммой скоростей:

$$V = V_1 + V_{2\alpha}.$$

При наклоне инструмента на угол  $\beta$  (рис. 6) в плоскости, совпадающей с вектором скорости перемещения инструмента, скорость  $V_{2\beta}$  направлена перпендикулярно скорости  $V_1$  и зависит от направления вращения инструмента и наклона угла  $\beta$ . В этом случае скорость выглаживания определяется из выражения:

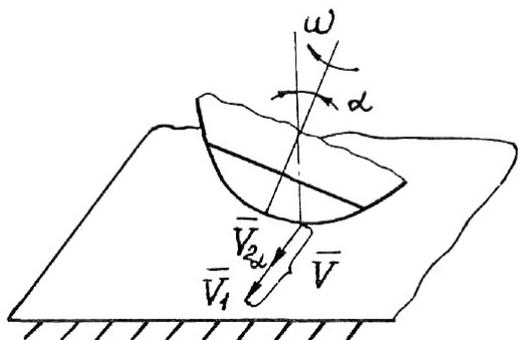


Рис. 5. Схема определения величины и направления скорости выглаживания при наклоне инструмента в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения инструмента

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_{2\beta}^2},$$

а угол  $\psi$  между вектором скорости выглаживания и направлением перемещения инструмента вычисляется по формуле:

$$\psi = \text{arctg} \frac{V_{2\beta}}{V_1}.$$

В общем случае, когда наклон инструмента осуществляется одновременно в двух плоскостях на углы  $\alpha$  и  $\beta$ , величина и направление скорости выглаживания будут определяться следующим образом:

$$V = \sqrt{(V_1 + V_{2\alpha})^2 + V_{2\beta}^2}; \quad (5)$$

$$\psi = \text{arctg} \frac{V_{2\beta}}{V_1 + V_{2\alpha}}. \quad (6)$$

С учетом формул (3) и (4) выражения (5) и (6) примут следующий вид:

$$V = \sqrt{(V_1 + \omega \cdot R \cdot \sin \alpha)^2 + \omega^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \beta}; \quad (7)$$

$$\psi = \text{arctg} \frac{\omega \cdot R \cdot \sin \beta}{V_1 + \omega \cdot R \cdot \sin \alpha}. \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) направление угловой скорости  $\omega$  и отсчет углов  $\alpha$ ,  $\beta$  принимается положительным по направлению часовой стрелки. Для определения направления отсчета угла  $\psi$  необходимо руководствоваться векторной диаграммой сложения скоростей в каждом отдельном случае.

При изменении частоты вращения инструмента в диапазоне 50—200 об/мин, углов наклона инструмента  $\alpha$  и  $\beta$  от  $-30$  до  $+30^\circ$  скорость выгла-

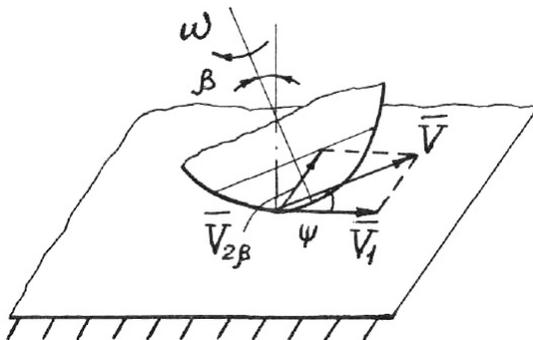


Рис. 6. Схема определения величины и направления скорости выглаживания при наклоне инструмента в плоскости, совпадающей с вектором скорости перемещения инструмента

живания меняется в диапазоне  $(0,16—2,0) V_1$ , а угол  $\psi$  направления перемещения инструмента изменяется от 0 до  $158^\circ$ .

Применение данного способа расширяет технологические возможности процесса алмазного выглаживания материалов с регулярной анизотропией свойств, позволяет осуществлять направленное регулирование параметров поверхностного слоя деталей: шероховатости, микротвердости, остаточных напряжений и т.д., которые во многом определяют их надежность и долговечность работы [2].

Таким образом, предлагаемые способы обработки монокристаллических материалов, обладающих регулярной анизотропией свойств, позволяют назначать наиболее выгодные режимы их обработки с учетом кристаллографической ориентации с целью получения оптимальных эксплуатационных свойств ответственных участков поверхности деталей ГТД и повышения ресурса их работы.

Согласно Перечню критических технологий, утвержденному Правительством Российской Федерации [3], технологии создания и обработки кристаллических материалов имеют важное стратегическое значение.

## Выводы

1. Применяемые в авиастроении материалы с направленной и МНК-структурой обладают анизотропией физико-механических свойств.

2. Проведенные авторами исследования особенностей механической обработки образцов из МНК

материала типа ЖС показали, что изменение радиальной составляющей силы резания, отклонение формы и шероховатости их поверхности имеют регулярный характер, обусловленный структурой материала.

3. Для обеспечения стабильных параметров качества деталей из МНК-материалов необходимо изменять режимы их обработки с учетом анизотропии свойств.

4. Авторами предложены корреляционные зависимости глубины резания и подачи от изменения твердости указанного материала.

5. Предложен способ алмазного выглаживания, позволяющий за счет изменения скорости вращения и угла наклона инструмента в различных плоскостях управлять величиной и направлением вектора скорости выглаживания.

## Библиографический список

1. Насонов В.Н., Павлов Ю.И., Петухов А.Н. и др. Обзор состояния и некоторые особенности развития аэрокосмических комплексов. — М.: МАТИ, 2005.

2. Сулима А.И., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. — М.: Машиностроение, 1988.

3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 августа 2008 г. № 1243-р.

РГТУ им. К.Э. Циолковского

Статья поступила в редакцию 28.03.2009