

4. Куфарев Г.Л., Окенов К.Б., Говорухин В.А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. – Фрунзе: Мектеп, 1970. – 170 с.

Иркутский государственный технический университет

УДК 621.787

Л.А.ХВОРОСТУХИН, В.В.КУРИЦЫНА

## ФОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

В данной работе представлены результаты исследования по решению технологических проблем, имеющих место при механической обработке изделий авиационной техники из монокристаллических материалов. Предложена модель формирования параметров поверхностного слоя детали при направленном поверхностно-пластическом деформировании алмазным индентором.

В авиационных двигателях основные требования к материалам и технологиям производства деталей обусловлены тенденциями развития их конструкций – повышение рабочих температур, силовых нагрузок, повышение ресурса работы. Интенсификация производства газотурбинных двигателей и установок обострила проблему изготовления класса высоконагруженных деталей из особо прочных и жаропрочных конструкционных материалов (какими являются в частности, рабочие лопатки турбин ГТД). Это обусловлено:

- сложностью формы деталей;
- высокими требованиями по точности геометрических параметров поверхности на уровне 5-7 квалитетов, шероховатости поверхности 1,25 мкм;
- необходимостью формирования поверхностного слоя с регламентированными свойствами, высокой несущей способностью, с распределением предпочтительных остаточных напряжений сжатия.

Ведущее и перспективное место среди жаропрочных сплавов принадлежит литейным, новым направленнокристаллизованным, монокристаллическим сплавам.

Эффективным методом повышения прочности поверхностного слоя деталей является поверхностное пластическое деформирование, связанное с образованием остаточных напряжений сжатия, повышением твердости, несущей способности поверхности, коррозионной стойкости. Однако эффективность деформационного упрочнения по мере повышения температуры испытания снижается и при некоторой критической температуре прочность исходного материала (недеформированного) становится равной прочности деформированного сплава. При этом следует отметить, что во время эксплуатации в поверхностном слое монокристаллического материала лопатки, имеющем высокий уровень остаточных напряжений и деформационного упрочнения, возможно увеличение интенсивности протекания процессов рекристаллизации монокристаллического материала, что недопустимо. Для создания оптимальной степени упрочнения и остаточных напряжений после ППД целесообразно применять термообработку лопаток в виде высокотемпературного термовакуумного отжига с оптимальными режимами.

Однако одной из важных проблем в проектировании технологических процессов механической обработки деталей из монокристаллических сплавов является анизотропия физико-механических свойств материала в различных направлениях. При обработке лопа-

ток турбин из монокристаллических материалов значительная анизотропия их физико-механических характеристик оказывает влияние на геометрическое и физическое состояние поверхности. Сочетание анизотропии свойств материала со сложной геометрической формой детали и необходимостью повышения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей составляет сложную конструкторско-технологическую задачу.

Предпосылками к решению такой задачи служат:

1. Создание математического описания влияния эксплуатационных факторов рабочей среды на различные участки исследуемой детали на основе статистических, опытных данных.
2. Создание математического описания анизотропных свойств монокристаллического сплава по отношению к воздействию технологических факторов обработки.
3. Создание математической модели формирования упрочненного поверхностного слоя при ППД.

Применение современных численных методов анализа сложной геометрии формы деталей, численных методов анализа функций, поиска экстремумов при решении многовариантных задач обуславливает техническую возможность решения такой задачи путем создания программно-технологического комплекса направленного поверхностно-пластического деформирования деталей типа лопаток ГТД.

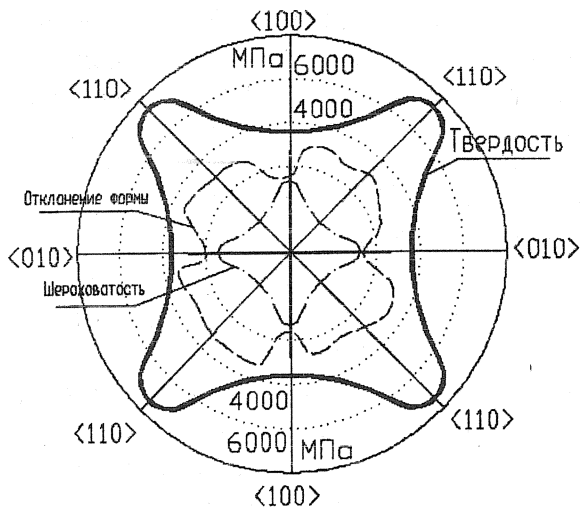


Рис.1. Согласование диаграммы распределения твердости поверхностного слоя образца из монокристаллического сплава ЖС-32 с кристаллографической ориентацией и другими параметрами поверхности.

резца и лучей ориентации кристалла, что обусловлено кристаллической структурой исследуемого материала (рис.1).

Результаты измерения канавок, проведенных алмазным наконечником  $R_{сф}=1,5$  мм, с усилием вдавливания  $P_y=120$  Н в продольном и поперечном направлении цилиндрических образцов, показали, что ширина и глубина прямых и круговых канавок изменяется в соответствии с их кристаллографической ориентацией.

Кристаллическая решетка монокристаллического сплава ЖС-32, широко используемого в производстве лопаток, имеет форму гранцентрированного куба. Вследствие неодинаковой плотности атомов в различных плоскостях и направлениях решетки многие свойства каждого кристалла зависят от направления его кристаллографической ориентации. Для выявления особенностей процесса обработки деталей из указанного материала была произведена оценка сопротивления поверхностного слоя упруго-пластическому деформированию. Результаты оценки влияния технологических факторов обработки на геометрические и физические параметры поверхностного слоя монокристаллических образцов и влияния на эти параметры анизотропии монокристалла представлены в работе [1].

Диаграммы шероховатости, отклонения формы, твердости хорошо согласуются и имеют четкий регулярный характер по мере изменения угла нормали к поверхности об-

С целью стабилизации и улучшения параметров поверхностного слоя, особенно уменьшения разброса шероховатости, целесообразно дополнительно учитывать кристаллографическую ориентацию пера и замка лопаток при разработке технологических решений их обработки.

Для уменьшения влияния анизотропии свойств монокристаллического материала на отклонение формы и шероховатость в процессе механической обработки необходимо корректировать режимы резания или геометрические параметры режущей части инструмента.

Полученные экспериментальные зависимости изменения глубины резания и подачи в соответствии с выявленной диаграммой твердости (рис. 1) позволяют уменьшить отклонение формы и перепад значений шероховатости обработанной поверхности:

$$t_i = t_0 \cdot \left( 1 + k' \frac{H_i - H_{\min}}{H_{\min}} \right), \quad (1)$$

$$s_i = s_0 \left( \frac{H_i}{H_{\max}} \right)^{k''}, \quad (2)$$

где  $t_i$  - переменное значение глубины резания;

$t_0$  - начальное заданное значение глубины резания;

$H_i$  - переменное значение твердости по диаграмме твердости;

$H_{\max}$ ,  $H_{\min}$  - минимальное и максимальное значения твердости обрабатываемого материала

$s_i$  - переменное значение подачи;

$s_0$  - начальное заданное значение подачи;

$k'$ ,  $k''$  - коэффициенты, определяемые экспериментально для конкретных условий обработки.

Улучшение обрабатываемости резанием такого материала, каким является ЖС-32, может быть достигнуто за счет предварительного поверхностно-пластического деформирования обрабатываемого слоя, осуществляемого выглаживанием, обкаткой шариками, вибрационной обработкой и др. Твердость поверхностного слоя при этом возрастает с 3900 до 7100 Мпа. При срезании деформированного слоя сопротивление сдвигу возрастает, но это вызывает некоторый поворот конечной границы пластической деформации, что приводит к сужению зоны деформации, увеличению угла сдвига, уменьшению усадки, сил и температуры резания.

Модель формирования свойств поверхности сложной формы из монокристаллического сплава основана на принципе суперпозиции технологического наследования трех составляющих факторов при образовании поверхностного слоя:

1. Функция описания характеристик геометрии детали в полярной системе координат, т.е. геометрическая модель детали, позволяющая определить такие характеристики, как координаты точек поверхности, ориентацию нормали к каждой точке поверхности по отношению к направлению начала отсчета

$$\{\alpha_N\} = f_1(\varphi, \rho, z). \quad (3)$$

2. Эпюры (функции) распределения характеристик воздействия рабочей среды по поверхности детали, действующих на нее во время эксплуатации (составляются по экспериментальным, статистическим или расчетным данным о рабочих процессах, в которых принимает участие исследуемая деталь), построенные в той же системе координат:

$$\{R\} = f_2(\varphi, \rho, z), \quad (4)$$

$\{R\}$  - вектор параметров рабочего процесса (давление, параметры газового потока, термонапряженность, охлаждаемость, и.т.п.).

3. Функция распределения свойств анизотропии монокристалла, проявляющихся в неравномерности характера обработки по различным направлениям, построенная в системе координат монокристалла:

$$\{X_0\} = f_3(\varphi_0), \quad (5)$$

$\{X_0\}$  - вектор параметров состояния поверхностного слоя образца монокристаллического сплава после обработки.

Оптимизационная задача состоит в определении угла ( $\Delta\varphi$ ) ориентации системы координат детали относительно системы координат монокристалла, при котором лучшие значения характеристик поверхностного слоя оказываются на участках поверхности, испытывающих наибольшие и критические эксплуатационные нагрузки. При построении целевой функции оптимизации целесообразно учитывать степень значимости влияния того или иного параметра рабочих нагрузок на состояние детали в ходе эксплуатации, а так же степень значимости того или иного параметра качества поверхностного слоя, который способствует повышению стойкости поверхности к воздействию этих нагрузок. Учет обеспечивается введением в уравнение целевой функции вектора коэффициентов значимости для эксплуатационных нагрузок  $\{k_R\}$  и вектора коэффициентов значимости параметров качества поверхностного слоя  $\{k_X\}$ . Варьирование значений коэффициентов (от 0 до 1) позволяет значительно уменьшить число решений задачи и выбрать оптимальное, применительно к конкретным условиям производства и эксплуатации. Таким образом, целевая функция оптимизации имеет вид

$$Q = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} (|\{R\} \cdot \{k_R\} - \{X_0\} \cdot \{k_X\}|) d\varphi, \quad (6)$$

$$Q \rightarrow \min$$

где аргументом функции  $\{X_0\}$  является угол  $\varphi_0 = \alpha_N + \varphi + \Delta\varphi$  (рис.2) и с учетом (3) имеем  $\varphi_0 = f_1(\varphi) + \varphi + \Delta\varphi$ . Решая систему относительно  $\Delta\varphi$ , определяем оптимальную кристаллографическую ориентацию пера лопатки.

Физический смысл минимизации предложенной функции заключается в сведении к минимуму количества несовпадений критических (с точки зрения воздействия рабочей среды) участков поверхности с участками, имеющими высокие эксплуатационные качества поверхности.

Известное распределение свойств монокристалла по поверхности лопатки открывает возможность применения технологии направленной поверхностной комбинированной обработки (ППД, модификация, нанесение покрытия...): во-первых, с целью создания оптимальных свойств поверхностного слоя пропорционально степени нагруженности участков поверхности; во-вторых, с целью устранения или сведения к минимуму отрицательных проявлений неравномерности качества обработки поверхности вследствие анизотропии кристалла, что достигается автоматическим регулированием режимов обработки. В частности, технологию направленного алмазного выглаживания (рис.3) с управляемым режимом обработки позволяет реализовать программно-технологический комплекс на базе ЭВМ и установки с ЧПУ, включающий пакет программного обеспечения, следящее уст-

ройство, систему интерфейсов и обратных связей, что является практическим воплощением предлагаемой математической модели.

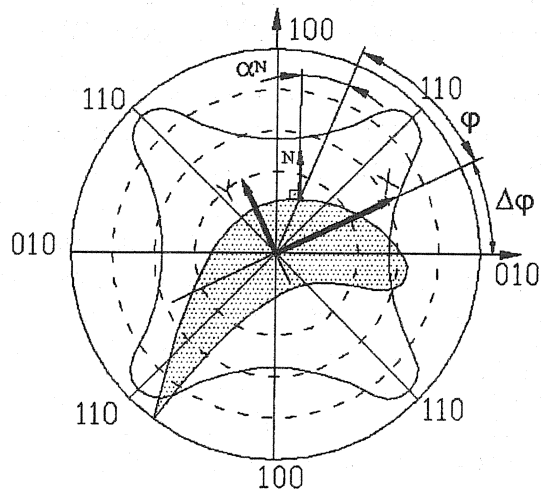


Рис.2. Кристаллографическая ориентация пера лопатки

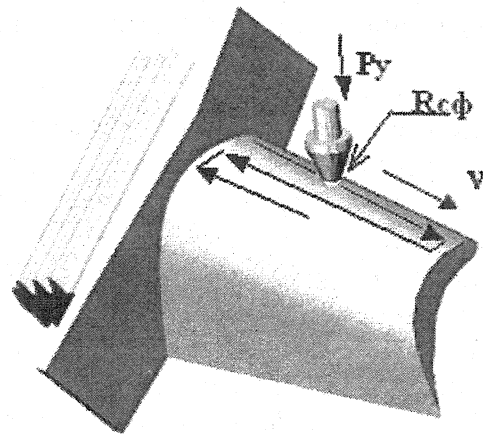


Рис.3. Продольная схема алмазного выглаживания пера лопатки.

Таким образом, предлагаемая модель формирования свойств поверхности изделий сложной формы из монокристаллических сплавов позволяет обеспечить оптимальную кристаллографическую ориентацию детали и, учитывая эту ориентацию, назначать наиболее выгодные режимы обработки комбинированным упрочнением с целью получения высоких эксплуатационных свойств ответственных участков поверхности и повышения ресурса работы деталей. Использование данной модели в качестве системы прогнозирования позволяет выявить критические факторы в производстве деталей такого класса без многочисленных дорогостоящих экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хворостухин Л.А., Курицына В.В., Со Кен Су, Ильинская О.И. Влияние упрочнения на качество поверхности изделий из монокристаллических сплавов./ Научные труды МАТИ им. К.Э.Циолковского. Вып.2(74).-М.: Изд-во "ЛАТМЭС",1999,с.195-199.

Российский государственный технологический университет им. К.Э.Циолковского «МАТИ»