

6
466

15 637

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Пермский политехнический институт

Г.Д. САЛО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ
ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

(Специальность № 164 - Технология машиностроения)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

д и с с е р т а ц и и на соискание
ученой степени

кандидата технических наук

Научные руководители:

Доктор технических наук,
профессор В.В. АБРАМОВ.

Кандидат технических наук,
доцент Б.Я. БОРИСОВ

Пермь - 1971г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Пермский политехнический институт

Г.Д. САДО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ
ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

(Специальность № 164 - Технология машиностроения)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

д и с с е р т а ц и и на соискание
ученой степени

кандидата технических наук

Научные руководители:

Доктор технических наук,
профессор В.В.АБРАМОВ.

Кандидат технических наук,
доцент Б.Я.БОРИСОВ

Пермь - 1971г.



Работа выполнена на кафедре "Станки и инструмент"

Запорожского машиностроительного института
им. В. Я. Чубаря

Научные руководители:

1. Доктор технических наук, профессор В. В. Абрамов
2. Кандидат технических наук, доцент Б. Я. Борисов

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук, профессор А. А. Михайлов
2. Кандидат технических наук, доцент В. Е. Логинов

Ведущее предприятие - Запорожский моторостроительный завод

Автореферат разослан "22" марта 1971 г.

Защита диссертации состоится "23" апреля 1971 г.
на заседании Ученого Совета Пермского политехнического института.

Адрес: г. Пермь, ГСП-45, Комсомольский пр., № 29^а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пермского политехнического института.

Отзывы на автореферат просим присылать в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
кандидат технических наук,
доцент



(Э. ЯРЕСЬКО)

Одной из главных задач, стоящих перед машиностроителями является создание машин, обладающих высокой надежностью и долговечностью в эксплуатации.

Повышение требований к быстроходности, надежности и долговечности машин вызвало необходимость повышения точности обработки деталей и улучшения качества обрабатываемых поверхностей их. Одним из основных показателей качества поверхности являются напряжения, возникающие в результате действия температуры, сил резания и фазовых превращений при различных видах обработки деталей и, в частности, при шлифовании. Необходимость изучения напряжений в процессе шлифования возросла в результате внедрения низкотеплопроводных хромоникелевых и титановых сплавов, получивших широкое распространение в авиадвигателестроении.

В настоящее время напряжения и деформации при шлифовании определяются экспериментально и аналитически. Экспериментальные методы позволяют получить достаточно достоверные результаты, но они являются трудоемкими, требуют большой затраты времени на их проведение и, как правило, связаны с необходимостью разрушения исследуемых деталей. Экспериментальные методы нуждаются в совершенствовании. Аналитические методы, которые освещены в ряде работ, позволяют исследовать только отдельные факторы, определяющие величины напряжений и деформаций. В одних работах приводятся формулы вычисления только возникающих при шлифовании деформаций, в других - формулы для вычисления напряжений через возникшие деформации, в третьих - вычисляются напряжения, вызванные только структурными и фазовыми превращениями. Метод Подзее А. В. позволяет более полно исследовать напряженное состояние шлифуемых деталей. Этим методом можно вычислять рас-

ДЛЯ КОПИИ

пределение остаточных напряжений по сечению детали. Однако метод Подзеля А.В. не учитывает влияние силового фактора на формирование напряжений, не позволяет вычислять временные напряжения.

В теории сопротивления материалов известен метод расчленения тела, позволяющий определять временные и остаточные напряжения в деталях любой формы в условиях упруго-пластического деформирования с учетом изменения физико-механических характеристик материала в зависимости от температуры, с учетом неравнопрочности материала, структурных и фазовых превращений, а также наличия в детали начального напряженного состояния. В таком виде данный метод не применялся для определения напряжений при шлифовании.

Известно, что при шлифовании преобладающим фактором в формировании напряжений является температура, для измерения которой широко применяется метод термопар. Применяемые термопары имеют сравнительно большой объем горячего спая, что является недостатком. Это требует совершенствования существующих конструкций термопар.

В связи с этим возникла необходимость проведения исследований остаточных напряжений при шлифовании жаропрочных сплавов, целью которых является установление возможности применения метода расчленения тела для аналитического определения временных и остаточных напряжений.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать методику вычисления напряжений при шлифова-

нии на основе метода расчленения тела с учетом влияния температуры, структурных и фазовых превращений, а также сил резания.

2. Разработать и изготовить термопару, дающую возможность определять контактные температуры и температурные поля с максимально возможной достоверностью. Построить температурные поля при шлифовании исследуемых сплавов, необходимые для аналитического определения напряжений.

3. Сопоставить результаты аналитического метода определения напряжений с экспериментальным. Установить зависимость экспериментальных остаточных напряжений от параметров режима шлифования.

Работа состоит из шести глав.

В первой главе дан краткий обзор литературы, в которой описаны методы определения напряжений в металлах и сплавах, используемые в настоящее время в практике. Существующие методы можно условно разделить на три основные группы.

1. Экспериментальные методы, к которым относятся:

- механические;
- рентгеновские;
- методы муара;
- поляризационно-оптические (методы фотоупругости);
- метод хрупких покрытий;
- неразрушающие методы;
- прочие.

2. Экспериментально-аналитические методы

3. Аналитические.

Все перечисленные методы представляют значительные труд-

ности при исследовании напряжений в шлифуемых деталях.

Особое внимание уделено аналитическим исследованиям напряжений при шлифовании металлов. В этом направлении достигнуты значительные успехи. Известными учеными А.И.Исаевым, Б.С.Коротиним, Б.И.Костецким, Б.А.Кравченко, А.А.Маталиным, А.В.Подземем, С.С.Силиным, Л.А.Сухининой, Ф.П.Уривским, А.В.Якимовым и др. созданы расчетные методы определения напряжений в шлифуемых деталях.

Дальнейшим развитием аналитических исследований напряжений при шлифовании может быть расчет по методу расчленения тела, разработанному Абрамовым В.В. Применение этого метода позволит учесть дополнительные факторы, влияющие на формирование напряжений, которые не учитывались в упомянутых выше методах.

Во второй главе изложены результаты температурных исследований при шлифовании.

Тепловой процесс при шлифовании отличается большой скоростью нагрева поверхности, высокими температурами, возникающими на поверхности контакта шлифовального круга с деталью, а также наличием значительных градиентов температуры по сечению. Для получения достоверных результатов температурных исследований необходимо применять термопары с минимальным объемом горячего спая, чтобы можно было улавливать мгновенные изменения температур в тончайших поверхностных слоях и в слоях, расположенных на различной глубине от поверхности резания.

В Запорожском машиностроительном институте, на кафедре "Станки и инструмент" при участии автора была разработана конструкция универсальной микротермопары, обладающей значительно меньшей массой горячего спая, чем ранее применявшиеся и позволяющей исследовать

температурные поля и контактные температуры при шлифовании и др. процессах резания.

Микротермопара представляет собой механическое соединение двух электродов: термоэлектродной проволоки $\phi 0,02+0,03$ мм и исследуемого материала в виде составного образца. Проволочный термоэлектрод изготавливается прессованием в специальном штампе. При этом создается головка, объем которой $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ мм³ и стебель толщиной 0,005 мм. Стебель электрода, изолированный слюдяными прокладками толщиной 0,005+0,008 мм укладывается между двумя частями шлифуемого образца. При сжатии образца в месте его контакта с головкой электрода возникает горячий спай термопары "материал проволоки - обрабатываемый материал".

Температурные исследования проводились при плоском врезном шлифовании жаропрочных сплавов ЭИ437БВД, ОТ4-1 на станке мод.371М1. Эксперименты проводились на следующих режимах: скорость шлифования $V_{кр} - 30$ м/сек; скорость движения детали $V_d = 0,05; 0,1; 0,2$ м/сек; глубина шлифования $t_{\phi} - 0,02$ мм. Для хромоникелевого сплава ЭИ437БВД использовался круг 200 x 35 x 75 ЭБ40СМ2К, а для титанового сплава ОТ4-1 - круг 200x35x75 К325СМ2К. Шлифование производилось без охлаждения. Величины температур, возникающие при шлифовании, регистрировались магнито-электрическим осциллографом. Для правильной расшифровки зафиксированных на осциллограммах температур применялась частотная коррекция вибраторов осциллографа.

Применяемые в экспериментах микротермопары подвергались градуировке путем сравнения показаний исследуемых термопар с образцовой. Для предотвращения окисления металлов при нагреве термопар до высо-

ких температур использовалась специальная установка, имеющая вакуумную камеру, в которой и производилась градуировка.

Известно, что при шлифовании наиболее опасные напряжения возникают тогда, когда температурные градиенты достигают наибольших значений. Поэтому необходимо установить время наступления максимальных градиентов по сечению шлифуемого изделия, чтобы затем строить температурные поля. На основании пространственно-временного распределения температур, полученного при плоском врезном шлифовании сплава ЭИ437БВД, на режиме: $V_{кр} = 30$ м/сек; $V_{\partial} = 0,05$ м/сек; $t = 0,02$ мм, строились температурные поля по сечению поверхностного слоя для разных моментов времени (τ). Анализируя температурные поля, было установлено, что критическим по напряженности является момент $\tau_1 = 0,008$ сек. Возникающее при резании тепло концентрируется в наиболее тонком поверхностном слое, и в этот момент создаются наибольшие градиенты температуры по сечению образца. Таким образом, в момент τ_1 следует строить температурные поля и на их основании аналитически вычислять напряжения в поверхностных слоях. Момент τ_1 соответствует окончанию времени нагрева τ_H действующего при шлифовании теплового источника.

Определение контактных температур и температурных полей сплавов ЭИ437БВД и ОТ4-1 на исследуемых режимах осуществлялось в результате по меньшей мере трехкратного повторения каждого эксперимента. Полученные экспериментальные значения были обработаны методом нулевых сумм и на их основании выведены уравнения зависимости между величиной температуры T и расстоянием X от поверхности обработки. Уравнения исследованных экспериментальных температурных полей приведены в табл. I.

Таблица I.

№ п/п	№ материала	Скорость детали м/сек	Уравнения температурного поля
1	ЭИ437БВД	0,05	$T = 875 - 4,47X - 1,70X^2$
		0,1	$T = 770 - 3,3X - 2,88X^2$
		0,2	$T = 650 - 3,58X - 6,06X^2$
2	ОТ4-1	0,05	$T = 860 - 3,68X + 0,82X^2$
		0,1	$T = 830 - 3,57X - 0,52X^2$
		0,2	$T = 750 - 4,71X - 3,44X^2$

Температурные поля при шлифовании с достаточной точностью описываются экспоненциальной кривой, а в логарифмических координатах выражаются уравнением параболы второго порядка.

Наряду с построением температурных полей была установлена зависимость контактных температур от параметров режимов шлифования: скорости движения детали V_{∂} и глубины шлифования t . С ростом V_{∂} температура уменьшается, а с увеличением t - растет. Это наблюдается при шлифовании обоих исследованных сплавов.

В третьей главе изложена теоретическая часть исследований напряжений, в основе которой лежит метод расчленения тела.

В процессе одностороннего шлифования тонких деталей, получившего широкое распространение, происходит упруго-пластическое деформирование изгиба под действием тепла, выделяющегося в зоне резания. Такой случай несимметричного температурного нагружения

является одной из задач по вычислению внутренних напряжений и деформаций, решаемых методом расчленения тела.

При решении задачи по методу расчленения тела поперечное сечение элемента разбивается на произвольное число n слоев. Для каждого слоя устанавливается средняя температура и соответствующие ей значения пределов текучести на растяжение σ_p^T и сжатие σ_c^T , модуля упругости E , относительного температурного расширения δ .

Общее решение для вычисления напряжений имеет вид:

$$\sigma_i = \left[-\delta_i + e + \left(-y_i + \frac{R_1}{R_0} \right) \alpha \right] E_i; \quad (1)$$

$$e = \frac{P + R\delta}{R_0}; \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{R\delta R_1 - R\delta_1 R_0}{(R_1)^2 - R_2 R_0}; \quad (3)$$

где:

$$R_0 = \sum_{i=1}^{i=n} E_i F_i;$$

$$R\delta = \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i E_i F_i;$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^{i=n} y_i E_i F_i;$$

$$R\delta_1 = \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i y_i E_i F_i;$$

$$R_2 = \sum_{i=1}^{i=n} E_i F_i y_i^2. \quad (4)$$

В уравнениях (1) + (4) приняты следующие обозначения:

P - равнодействующая от всех приложенных к пластине механических сил;

y_i - расстояние волокна i от поверхности обработки;

$\delta_i = f_i(T_0, \Delta y_i)$ - разность приращения относительного свободного (температурного + структурного) расширения между волокном i и любым другим волокном, принятым за начало отсчета в рассматриваемом поперечном сечении. В данной работе начало отсчета принято на поверхности тела;

T_0 - наибольшая разность температур по поперечному сечению пластины;

Δy_i - разность удельных объемов структурных составляющих по поперечному сечению пластины;

E_i, F_i - соответственно модуль упругости и площадь поперечного сечения рассматриваемого волокна;

α - относительный угол поворота жестких сечений относительно друг друга.

Затем для каждого слоя вычисляют возможные напряжения:

$$\sigma_i^j = \sigma_i^{T(j)} - \sigma_{p_i}^{(j-1)}, \quad (5)$$

где: $\sigma_i^{T(j)}$ - предел текучести материала в слое i в исследуемый момент нагрева или охлаждения; если задача решается с учетом неравнопрочности материала, то величины и знак $\sigma_i^{T(j)}$ выбираются соответственно знаку упругого расчета σ_i в слое;

$\sigma_{p_i}^{(j-1)}$ - результирующее напряжение в слое i в предшествующий рассматриваемому момент нагрева или охлаждения.

Сравнивая напряжения σ_i упругого расчета с возможными напряжениями, вычисляют коэффициенты

$$K_i = \left| \frac{\sigma_i}{\sigma_i^j} \right| \quad (6)$$

Если напряжение упругого расчета в слое превышает возможное

напряжение или равно ему, т.е. $K_i \geq 1$, то слой подвергается пластической деформации. Для пластически деформированных слоев напряжения принимают равными возможным напряжениям с их знаками.

Далее выполняется упруго-пластический расчет: пересчитываются коэффициенты R_{ij} , заново вычисляются напряжения σ_i в остальных слоях сечения по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i^y &= \left[-\delta + \frac{P + R_\delta - \sum_{m=1}^n \sigma_i^{ny} F_i}{\rho} + \left(-y_i + \frac{R_i}{R_0}\right) \alpha \right] E_i \\ \sigma_i^n &= \sigma_i^{ny} \end{aligned} \right\} (7)$$

Относительный угол поворота гипотетического сечения

$$\alpha = \frac{(R_\delta - \sum_{m=1}^n \sigma_i^{ny} y_i F_i) R_0 - (R_\delta - \sum_{m=1}^n \sigma_i^{ny} F_i) R_i}{R_i^2 - R_2 R_0} (8)$$

Коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= \sum_1^m E_i F_i; & R_\delta &= \sum_1^m \delta_i y_i E_i F_i; \\ R_\delta &= \sum_1^m \delta_i E_i F_i; & R_2 &= \sum_1^m E_i F_i y_i^2. \\ R_i &= \sum_1^m y_i E_i F_i; \end{aligned} \right\} (9)$$

Полученные значения σ_i^y снова сравнивают с σ_i^n , пока для оставшихся слоев значения K_i будут меньше единицы.

Правильность решения задачи в каждом рассматриваемом интервале температур контролируется выполнением условий равновесия

$$\sum_{i=1}^{i=n} \sigma_i F_i = 0 \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^{i=n} y_i \sigma_i F_i = 0. (10)$$

Под величиной σ_i в формуле (I) следует понимать только величину изменения напряжения в слое i за некоторый промежуток времени в рассматриваемом интервале температур нагрева или охлаждения.

Поэтому результирующее (действительное) напряжение $\sigma_{Pi}^{(j)}$ в слое i в рассматриваемый момент времени τ_n равно алгебраической сумме результирующего напряжения σ_{Pi} в предшествующий рассматриваемому момент τ_{n-1} и изменения напряжения σ_i за промежуток времени $\Delta \tau_n = \tau_n - \tau_{n-1}$:

$$\sigma_{Pi}^{(j)} = \sigma_{Pi}^{(j-1)} + \sigma_i. (11)$$

В процессе шлифования поверхностные слои детали подвергаются сначала нагреву (за очень короткий промежуток времени), а затем сравнительно медленному охлаждению. Поэтому расчет напряжений, оставшихся после шлифования производят в два этапа:

для периода нагрева вычисляют напряжения нагружения σ^H , для периода охлаждения-напряжения разгрузки σ^P .

Если есть необходимость, можно вычислить напряжения для любого момента времени τ от начала действия теплового источника.

Остаточные напряжения находят, как алгебраическую сумму напряжений при нагреве и охлаждении.

$$\sigma_i^* = \sigma^H + \sigma^P. (12)$$

Полученные напряжения не могут быть больше σ_i^* , т.е. всегда должно быть неравенство $\frac{\sigma_i}{\sigma_i^*} \geq 1$.

Если это условие не соблюдается, то материал испытывает упруго-пластическую деформацию и, следовательно, напряжения нужно пересчитывать по изложенной методике.

Заключительный этап расчета можно вести несколько по-иному. После определения упругих напряжений σ_i^* вычисляются расчетные напряжения по формуле

$$\sigma_{Pi}^{(j)} = \sigma_{Pi}^{(j-1)} + \sigma_i^*. (11^a)$$

Возможные напряжения σ_i в этом случае по величине равны σ^T . Расчетные напряжения последнего этапа равны остаточным, возникшим в детали после ее обработки.

При решении задач по определению внутренних напряжений и деформаций, возникающих в процессе шлифования, было принято допущение, что напряженное состояние поверхностного слоя детали, создающееся подвижным тепловым источником, эквивалентно напряженному состоянию, возникающему при таком же нагреве сразу всего поверхностного слоя.

Для вычисления остаточных напряжений при шлифовании по методу расчленения тела необходимо иметь температурные поля по сечению детали и физико-механические свойства обрабатываемого материала в зависимости от температуры.

В данной работе для расчета напряжений приняты экспериментальные температурные поля, получение которых подробно описано в главе II. Необходимые для расчета механические свойства - модуль упругости и пределы текучести на растяжение σ_p^T и сжатие σ_c^T взяты из справочной литературы. Графики зависимости величин структурных и температурных относительных линейных расширений в зависимости от температуры, определялись экспериментально методом дилатометрирования. Дилатометрические исследования дали возможность в основу расчета напряжений ввести данные не только о температурных деформациях, но и о деформациях, вызванных структурными и фазовыми превращениями в поверхностных слоях шлифуемых сплавов.

Таким образом, с помощью изложенной методики, по экспериментальным температурным полям и физико-механическим свойствам с учетом их зависимости от температуры можно рассчитать суммарные внутренние напряжения от тепловых деформаций и возможных структур-

ных и фазовых превращений.

На формирование остаточных напряжений при шлифовании наряду с температурой и другими факторами оказывают влияние также силы резания. Поэтому был выполнен упруго-пластический расчет напряжений с учетом силы резания в полосе конечной толщины при изгибе с растяжением-сжатием. Для вычисления напряжений экспериментально были определены радиальная P_y и тангенциальная P_z составляющие силы резания при шлифовании сплава ЭИ437БВД в зависимости от параметров режима шлифования. Эксперименты проводились в Одесском политехническом институте на тензометрическом столике, изготовленном Некрасовым Е.Н.

Для вывода формул вычисления остаточных напряжений с учетом силы резания были сделаны некоторые допущения.

1. Обрабатываемая деталь рассматривается состоящей из продольных полосок, на каждую из которых действует одно абразивное зерно на протяжении всего процесса шлифования. При этом считается, что сила резания приложена в центре абразивного зерна, на расстоянии y_0 от поверхности обработки, равном радиусу зерна r_3 .

2. Значение составляющей силы резания P_z в расчетах не учитывается, т.к. ее действие в большей мере распространяется на снимаемый припуск и в весьма малой - на обработанную поверхность.

3. При нагрузке (абразивный круг шлифует деталь) знаки деформаций от действия температурного и силового факторов совпадают; при разгрузке (шлифование закончено) знак деформации от действия температуры меняется на обратный, силы резания при этом отсутствуют, следовательно, их влияние не учитывается.

Напряжения в каждом слое i шлифуемого образца от действия температуры и силы резания можно определить по формуле:

$$\sigma_i = [(-\delta + e) \pm \varepsilon_p + (-\gamma + \frac{R_i}{R_0}) \alpha] E \quad (13)$$

где: ε_p - относительная деформация от действия сил резания.

На основании выполненных расчетов было установлено, что при шлифовании исследованных сплавов в рассмотренном диапазоне режимов обработки силовой фактор не оказывает влияния на остаточные напряжения, формирующиеся в поверхностном слое на глубине до 0,05 мм, и лишь незначительно (до 5 %) изменяет их на большей глубине, где напряжение уже не влияет на качество поверхности. Правильность сделанного заключения подтверждается хорошим совпадением результатов расчета с экспериментом.

Таким образом, при шлифовании жаропрочных сплавов подтверждается предположение о преобладающем влиянии температуры на формирование остаточных напряжений и, поэтому, влиянием силового фактора можно пренебречь. Это совпадает с результатами исследований, проведенными Подзеем А.В. при помощи теплового моделирования.

По изложенной выше методике с применением ЭВМ "Минск 22" рассчитывались временные и остаточные напряжения, возникающие при шлифовании полосы и пластины из сплавов ЭИ437БВД и ОТ4-1. Вычислялись напряжения в полосе прямоугольного сечения с размерами $3 \times 14 \times 90$ при плоском врезном шлифовании без охлаждения на режимах, для которых были определены температурные поля, а также в пластине с размерами $3 \times 100 \times 100$ при шлифовании на режиме: $V_{кр} = 30$ м/сек; $V_{\partial} = 0,1$ м/сек; $t = 0,02$ мм; $S_{non} = 8$ мм/дв.х.

Выполненные расчеты позволили установить следующее:

а) в поверхностном слое образцов в виде полосы и пластины формируются остаточные напряжения растяжения, достигающие по величине предела текучести обрабатываемого материала и переходящие в сжимающие на глубине 0,15 + 0,25 мм от поверхности шлифования;

б) глубина пластически деформированного слоя равна 0,08 мм при $V_{\partial} = 0,05$ м/сек, и уменьшается с увеличением V_{∂} ;

в) остаточные напряжения, возникающие в пластине, по величине превосходят напряжения в полосе. Растягивающие напряжения в пластинах переходят в сжимающие на большей глубине, чем в полосе.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований напряжений, выполненных с целью проверки аналитических исследований, описанных в главе III.

Определялись остаточные напряжения при шлифовании исследуемых сплавов ЭИ437БВД и ОТ4-1 в виде полосы на режимах:

$V_{кр} = 30$ м/сек; $V_{\partial} = 0,01 + 0,3$ м/сек; $t = 0,005 + 0,07$ мм;
 $n = 5$ и пластины - $V_{кр} = 30$ м/сек; $V_{\partial} = 0,1$ м/сек; $S_n = 8$ мм/дв.х;
 $t = 0,02$ мм; $n = 5$.

напряжения определялись механическим методом Давиденкова Н.Н., развитого и дополненного Биргером И.А. с использованием ЭВМ.

В процессе экспериментирования были исследованы три метода измерения прогиба образца при срабатывании напряженных слоев: тензометрический, оптический и метод, в котором используются индуктивные преобразователи. Анализ результатов измерений и математическая обработка их показали, что наиболее стабильным, дающим наименьший разброс показаний, является оптический метод, который был применен для проведения экспериментов.

Экспериментальные определения остаточных напряжений дали возможность установить следующее:

а) при шлифовании на режимах со скоростью движения детали $V_{\partial} > 0,05$ м/сек в поверхностном слое формируются остаточные растягивающие напряжения, которые по величине превышают предел текучести материала и на глубине 0,25 + 0,35 мм переходят в сжимающие; при

$V_d < 0,05$ м/сек поверхностные напряжения растяжения уменьшаются и переходят в сжимающие;

б) остаточные растягивающие напряжения в пластинах по величине и глубине залегания превосходят напряжения в полосе.

В процессе экспериментирования изучалась зависимость остаточных напряжений от параметров режима шлифования: скорости движения детали, глубины шлифования и числа проходов. В технической литературе по этому поводу высказываются противоречивые мнения.

В результате исследований было установлено, что с ростом V_d поверхностные остаточные напряжения увеличиваются, а глубина залегания их уменьшается. На малых скоростях ($V_d < 0,02$ м/сек) поверхностные напряжения переходят в сжимающие. Это объясняется тем, что процесс шлифования характеризует большое число факторов (величина контактной температуры, градиент температуры, наличие релаксации напряжений), которые при различных значениях V_d по разному влияют на формирование остаточных напряжений. Причем все эти факторы определяются временем действия теплового источника, возникающего при шлифовании.

При увеличении скорости движения детали ($V_d > 0,01$ м/сек) контактная температура уменьшается, но градиент температуры растет, причем нарастает значение градиента быстрее, чем падает температура. Преобладающее влияние градиентов температуры вызывает рост остаточных растягивающих напряжений. Время действия источника в этом диапазоне скоростей мало, и процесс релаксации не успеваает произойти.

При уменьшении V_d ($< 0,1$ м/сек) температура повышается,

значение градиентов температуры уменьшается, но время действия источника увеличивается, что вызывает увеличение глубины прогрева поверхностного слоя. В результате происходит релаксация напряжений и растягивающие напряжения на поверхности уменьшаются до нуля. Имеющий место переход растягивающих напряжений в сжимающие можно объяснить явлением перераспределения их во времени.

При увеличении глубины прогрева характер распределения напряжений меняется во времени. В процессе охлаждения наступает момент, когда наружный слой делается холодным и перестает сокращаться в размерах, а внутренний слой металла будет продолжать охлаждаться и сокращаться. Этот сокращающийся слой, будет стягивать поверхностный твердый слой, одновременно ослабляя имеющиеся в нем растягивающие напряжения, вследствие чего максимум растягивающих напряжений будет смещаться от поверхности вглубь металла. При более глубоком прогреве охлаждение и сокращение внутренних слоев полностью снимает растягивающие напряжения в поверхностном слое и вызывает в нем напряжения сжатия, что и подтверждается экспериментами.

В процессе экспериментирования установлено, что при уменьшении V_d величина контактной температуры растет, а силы уменьшаются. Это еще раз говорит о том, что уменьшение напряжений в данном случае следует отнести за счет влияния процесса релаксации напряжений и других явлений, а не действия сил резания.

Полученная зависимость напряжений от скорости движения детали указывает на то, что изменением режимов шлифования можно добиться получения благоприятного распределения остаточных напряжений и, в частности, получения эпюры с нулевыми напряжениями на поверхности и близкими к нулю по сечению детали.

При увеличении глубины шлифования поверхностные напряжения изменяются незначительно, но глубина залегания их увеличивается. Таким образом можно сделать вывод, что величина поверхностных остаточных напряжений в большей мере зависит от скорости движения детали, а глубина залегания их - от глубины шлифования.

Число проходов не оказывает существенного влияния на напряженное состояние после стабилизации процесса шлифования.

В пятой главе анализируются выполненные в работе исследования и дается оценка разработанной методике вычисления напряжений при шлифовании на основе метода расчленения тела.

Сравнение экспериментальных и теоретических эпюр остаточных напряжений для изучаемых материалов указывает на удовлетворительное совпадение напряжений по величине, знаку и характеру распределения их по глубине для режимов шлифования, часто встречающихся в производственной практике. Это наблюдается при исследовании и пластины и полосы.

Однако, для случая шлифования сплава ЭИ437БВД на режиме $V_d = 0,05$ м/сек теоретические и экспериментальные эпюры остаточных напряжений согласуются хуже. Указанное расхождение будет проявляться тем больше, чем с меньшей скоростью детали ведется шлифование. Причина этого расхождения заключается в том, что, как отмечалось ранее, на формирование напряжений в этом диапазоне режима шлифования преобладающее влияние оказывает процесс релаксации. Но вычисление напряжений в данном случае выполнено на основании экспериментальных температурных полей без учета релаксации напряжений. Таким образом возникшее расхождение еще раз подтверждает правильность выдвигаемой гипотезы о влиянии процесса релаксации на формирование напряженного состояния.

Метод же расчленения тела позволяет вычислять временные и остаточные напряжения с учетом релаксации. Это дает возможность считать, что при наличии соответствующих данных удастся ликвидировать возникшее расхождение в результатах аналитических и экспериментальных исследований.

Возвращаясь к анализу результатов исследований, следует отметить, что для некоторых случаев даже при удовлетворительном совпадении характера экспериментальных и теоретических эпюр остаточных напряжений величины поверхностных напряжений несколько отличаются друг от друга. Для теоретических эпюр характерно наличие горизонтального участка в самом начале графика, соответствующего пределу текучести обрабатываемого материала. Экспериментальные же эпюры имеют постоянный подъем кривой у оси ординат, значительно превышающий предел текучести материала. Такое явление объясняется тем, что теоретический метод определения напряжений исходит из предпосылок об упруго-пластическом деформированном состоянии поверхностных слоев шлифуемых деталей, а экспериментальный - из предпосылок об упругом деформированном состоянии. Наряду с этим значительное повышение остаточных напряжений у поверхности можно было бы объяснить явлением упрочнения материала. Однако известно, что в результате упрочнения, напряжения могут повыситься не более, чем на 25 %, а значит имеющее место завышение поверхностных напряжений можно считать неправомерным. Таким образом, вид расчетных эпюр остаточных напряжений по глубине, до которой распространяются пластические деформации, точнее учитывает действительное напряженное состояние в детали, чем вид экспериментальных эпюр, несмотря на то,

что расчет был выполнен без учета упрочнения материала. В технической литературе процесс упрочнения материала поверхностного слоя при шлифовании освещен недостаточно.

Для оценки возможностей разработанной методики вычисления напряжений при шлифовании решение одного из примеров сравнивалось с решением аналитическим методом, разработанным в МАИ под руководством Подзеев А.В. Результаты показали, что для данных конкретных условий обработки метод расчленения тела позволил получить данные более близкие к экспериментальным, чем метод, разработанный в МАИ.

Таким образом, разработанная методика вычисления напряжений, в основе которой лежит метод расчленения тела, может быть применена в практике для исследования процесса шлифования. Если же необходимо определить временные напряжения, предлагаемая методика является незаменимой.

В шестой главе излагаются примеры практического применения результатов исследований, полученных в настоящей работе.

1. на основании разработанной методики вычисления напряжений была написана инструкция с приложением программы на ЭВМ "Минск - 22" для использования в производственных условиях.

Вычисление напряжений по разработанной методике можно выполнять не только при шлифовании, но и при других видах обработки металлов, сопровождающихся значительным тепловыделением в зоне удаления металла. На этом основании вычислялись остаточные и временные напряжения при обработке тугоплавких металлов электроконтактным методом. Результаты выполненных расчетов легли в основу оценки качества поверхности и разработки рекомендации по

выбору оптимальных технологических режимов при внедрении электроконтактного метода обработки тугоплавких металлов.

Разработанная методика определения напряжений позволяет вычислять временные в любой момент процесса шлифования и остаточные напряжения, и может быть использована для анализа трещинообразования на основании сведений об изменении физико-механических свойств материала в процессе обработки и о структурных и фазовых превращениях, происходящих в материале детали.

2. На основании проведенных исследований напряжений были изготовлены образцы с заранее известным и стабильно повторяющимся распределением остаточных напряжений по сечению поверхностного слоя. Такие образцы можно назвать "эталонными". Эталонные образцы применялись в лаборатории прочности Запорожского моторостроительного завода для настройки и контроля приборов измерения напряжений. Наряду с этим полученные образцы могут найти применение при исследовании напряжений новыми методами, в частности - методами неразрушающего контроля.

3. Разработанные микротермопары нашли применение в исследовательской практике и на производстве.

В лаборатории НИАТ микротермопары были применены для исследования процесса ленточного шлифования. Измерялись контактные температуры и строились температурные поля, характеризующиеся скоростью изменения температур до $2 \cdot 10^5$ °C/сек и величиной температурных градиентов 4000 °C/мм.

Дальнейшим развитием методики температурных исследований

было измерение температур одновременно в нескольких точках сечения поверхностного слоя при помощи пакета термпар. Измерение температур при помощи пакета производилось на Запорожском моторостроительном заводе в процессе фрезерования и шлифования труднообрабатываемых сталей и сплавов.

ВЫВОДЫ:

1. Разработанная методика теоретического определения временных и остаточных напряжений при шлифовании на основе метода расчленения тела позволила с некоторым приближением исследовать напряженное состояние шлифуемых деталей.

2. Полученная методика дала возможность рассчитывать напряжения с учетом изменения физико-механических характеристик материала от температуры, с учетом неравнопрочности материала, структурных и фазовых превращений его, а также наличия в детали начального напряженного состояния.

3. Примененные в исследованиях микротермопары, благодаря их сравнительно малому объему горячего спая, позволили определять контактные температуры и температурные поля при шлифовании с большей достоверностью, чем ранее используемые.

4. При определении напряжений аналитическим методом необходимо использовать температурные поля, построенные в тот момент, когда по сечению поверхностного слоя детали создаются наибольшие градиенты температуры.

5. Остаточные напряжения, полученные расчетным методом, удовлетворительно совпадают с результатами экспериментальных исследований при шлифовании на режимах, которые характери-

зуются преобладающим влиянием температуры на формирование напряженного состояния.

6. Анализ методов измерения деформаций образцов при сравнении напряженных слоев показал, что наиболее достоверным из всех исследованных является оптический метод.

7. На основании разработанной методики составлена инструкция по вычислению внутренних напряжений при шлифовании металлов и сплавов для производственного использования.

8. Полученные в экспериментах образцы со стабильно повторяющимися остаточными напряжениями можно использовать в качестве "эталонных" для оценки существующих и вновь применяемых методов и приборов определения напряжений.

9. Разработанную методику вычисления напряжений можно распространить на другие виды обработки металлов, которые сопровождаются значительным выделением тепла в зоне удаления металла, например, фрезерование, электроэрозионные методы обработки и др.

10. При помощи разработанной методики можно определять возникновение трещин в деталях при шлифовании и других видах обработки металлов.