

А.В. УСОВ

Одесский национальный политехнический университет

Л.А. ВОРОБЬОВА

Морской колледж технического флота Одесской национальной морской академии

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ И СПЛАВОВ

На основании моделей, описывающих термомеханические процессы, представлен анализ причин трещинообразования при шлифовании материалов и сплавов, склонных к этому виду дефектов. Показано, что интенсивность трещинообразования во многом определяется наличием различного рода неоднородностей, возникающих в поверхностном слое по ходу технологии изготовления детали и величиной теплового потока, поступающего в поверхностный слой.

Ключевые слова: трещинообразование, качество поверхностного слоя, шлифование, неоднородности, тепловой поток.

А.В. УСОВ

Одеський національний політехнічний університет

Л.О. ВОРОБЬОВА

Морський коледж технічного флоту Одеської національної морської академії

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ЯВИЩ НА ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ МАТЕРІАЛІВ ТА СПЛАВІВ

На основі моделей, які описують термомеханічні процеси, запропоновано аналіз причин тріщиноутворення при шліфуванні матеріалів та сплавів, які схильні до цього виду дефектів. Показано, що інтенсивність тріщиноутворення визначається наявністю різного роду неоднорідностей, які виникають у поверхневому шарі в залежності від технології виготовлення деталі та величиною теплового потоку, що поступає в поверхневий шар.

Ключові слова: тріщиноутворення, якість поверхневого шару, шліфування, неоднорідність, тепловий потік.

A.V. USOV

Odesa national polytechnic university

L.A. VOROBYOVA

Marine college of technical fleet of the Odesa national marine academy

DESIGN OF INFLUENCE OF THE THERMAL AND MECHANICAL PHENOMENA ON FORMATION OF CRACKS AT POLISHING OF MATERIALS AND ALLOYS

On the basis of models, describing thermal and mechanical processes, the analysis of reasons of formation of cracks is presented at polishing of materials and alloys, apt to this type of defects. It is shown that intensity of formation of cracks is in a great deal determined by the presence of different sort of, to heterogeneity, arising up in a superficial layer on motion technology of making of detail and in size thermal stream entering superficial layer.

Keywords: formation of cracks, quality of superficial layer, polishing, to heterogeneity thermal.

Введение

Качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей формируется под действием термомеханических явлений, сопровождающих финишные операции. Отличительной особенностью операции шлифования является выделение большого количества теплоты, основная часть которой воспринимается обрабатываемой деталью и вызывает на отдельных её участках структурные изменения – прижоги. Эти дефекты способствуют уменьшению исходной твёрдости поверхности, образованию растягивающих остаточных напряжений, снижают контактную выносливость, усталостную прочность деталей [1–3].

Анализ литературных данных и постановка проблемы

В фундаментальных работах [1–4] в качестве основного показателя физико-механического состояния обрабатываемых поверхностей используется теплонапряженность процесса шлифования. На основании разработанных в них моделей температурных полей изучены закономерности образования дефектов типа прижогов и технологические возможности их устранения в зависимости от теплофизических свойств обрабатываемых материалов, режимов обработки, конструкции и характеристик применяемых инструментов.

Для большой группы металлов и сплавов не подверженных структурным превращениям в процессе обработки характерным видом брака являются дефекты типа трещин, существенно снижающие эксплуатационные свойства изделий.

Характер и интенсивность трещинообразования во многом определяется теплофизическими свойствами обрабатываемых материалов, их структурой, наследственностью предыдущих технологических операций, режимами обработки, а также характеристиками инструмента. При эксплуатации деталей, поверхностный слой которых содержит шлифовочные трещины, разрушение изделий происходит по местам их скопления.

Поэтому задача определения технологических условий бездефектного шлифования и управления качеством поверхностного слоя изделий из материалов, склонных к трещино- и сколообразованию, является весьма актуальной. Это предопределяет необходимость изучения механизма формирования шлифовочных дефектов.

Феноменологический подход в изучении причин трещинообразования материалов, склонных к этому виду дефектов, не позволяет вскрыть механизм зарождения и развития шлифовочных трещин.

Интенсивность появления трещин во многом определяется наличием различного рода неоднородностей, возникающих в поверхностном слое по ходу технологии изготовления детали. Особенно опасными с точки зрения зарождения трещин, являются такие наследственные дефекты, как флокены, остроконечные полости, инородные включения. Поэтому построение теории трещинообразования при шлифовании с использованием критериев механики разрушения, возможно лишь на основе углубленного изучения механизма зарождения трещин в вершинах концентраторов, которыми являются металлургические, структурные и технологические дефекты.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является построение моделей, описывающих термомеханические процессы при обработке деталей из материалов и сплавов, поверхностный слой которых имеет наследственные неоднородности структурного или технологического происхождения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- разработать математическую модель, описывающую термомеханические процессы в поверхностном слое при шлифовании деталей из материалов и сплавов с учетом их неоднородностей, влияющих на формирование шлифовочных трещин и определить критерии дефектообразования;
- создать методику выбора технологических условий шлифования материалов, имеющих наследственные неоднородности, обеспечивающих требуемые показатели качества;

Моделирование термомеханических явлений при шлифовании материалов с учетом неоднородностей в их поверхностном слое

При выборе и обосновании математической модели учитывалось, что процесс шлифования деталей сопровождается как тепловыми, так и механическими явлениями. Однако преобладающее воздействие на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя оказывают температурные поля. Так как для исследований термомеханического состояния шлифованных поверхностей важной является информация о распространении температур и напряжений по глубине и в направлении движения инструмента, то рассматривается плоская задача.

Анализ масштабных схем взаимодействия круга с обрабатываемой поверхностью показывает, что кривизна круга и детали в пределах зоны контакта несущественно влияет на геометрическую схему взаимодействия круга с деталью. Поэтому при составлении расчетной схемы (рис.1) допускается, что деталь типа заготовок может быть представлена в виде кусочно-однородных условных слоев, с разными свойствами, расположенных на основном материале-матрице, что позволяет изучать термомеханические процессы при шлифовании деталей с несколькими типами покрытий, толщиной Δa_k наносимых на основной материал. Такая схема предопределяет тепловые и деформационные условия сопряжения слоев по границам их раздела – a_k .

Влияние неоднородностей в виде фазовых превращений неустойчивых структур, межзеренных плёнок, границ контура наследственных аустенитных зёрен, карбидной строчечности, неметаллических включений, раковин, флокенов и других дефектов, возникающих в поверхностном слое по ходу технологического процесса, учитывается в модели наличием в поверхностном слое включений и дефектов в виде условных трещин (рис. 1).

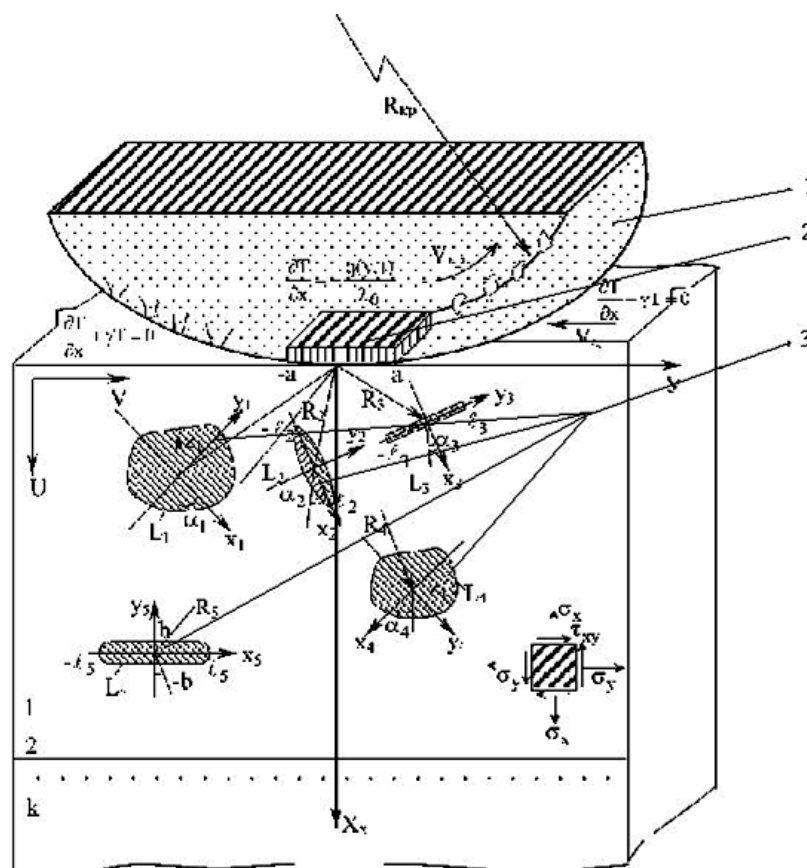


Рис. 1. Расчетная схема для моделирования влияния технологических неоднородностей на трещинообразование при шлифовании материалов, склонных к данным дефектам: 1 – шлифовальный круг радиуса $R_{кр}$; 2 – зона контакта круга с обрабатываемой поверхностью; 3 – поверхностный слой, содержащий наследственные дефекты с указанием их характерных размеров L_i и углов ориентации α_i ; локальных координат; k – слой, в котором исследуются термомеханические процессы ($k = 1, 2, \dots$).

Система уравнений, определяющих тепловое и напряженно-деформированное состояние при шлифовании поверхности деталей с k -покрытиями, верхний слой которых имеет неоднородности типа включений (неправильной округлой формы) и микротрещин (эллипсоидальной формы с большей полуосью L), содержится в [5,6]:

Уравнение нестационарной теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad 0 \leq x < \infty; \quad -\infty < y < \infty. \quad (1)$$

Уравнение упругости Ламе в перемещениях

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G}; \quad \bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial y}; \quad B^T = \frac{4G(1+\mu)}{1-2\mu} a_k; \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где $T(x, y, \tau)$ – температура в точке с координатами (x, y) и в любой момент времени τ ; a – температуропроводность материала; a_t – температурный коэффициент линейного расширения; μ, G – постоянные Ламе; u, v – компоненты вектора перемещений точки (x, y) ; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа.

Начальные условия для данной задачи можно взять в виде: $T(x, y, 0) = 0. \quad (4)$

Граничные условия для температурных и деформационных полей, учитывающие теплообмен с поверхности вне зоны контакта круга с деталью и интенсивного тепловыделения в зоне обработки имеют вид:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q(y, \tau)}{\lambda}, |y| < a^*, -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \gamma T = 0, |y| > a^* \quad (5)$$

$$\sigma_x(x, y, \tau)|_{x=0} = \tau_{xy}(x, y, \tau)|_{x=0} = 0, \quad (6)$$

где $q(y, \tau)$ – интенсивность теплового потока, формирующегося в результате взаимодействия круга с деталью; λ – коэффициент теплопроводности шлифуемого материала; $2a^*$ – длина зоны контакта круга с обрабатываемой поверхностью; γ – коэффициент теплообмена с окружающей средой; σ_x, τ_{xy} – нормальные и касательные напряжения.

Условия сопряжения слоёв (покрытий):

для температурных полей	для деформационных полей
$T^{k-1}(a_k - 0, y, \tau) = T^k(a_k + 0, y, \tau);$	$v_j^{k-1}(a_k - 0, y) = v_j^k(a_k + 0, y);$
$\lambda_{k-q} \frac{\partial T}{\partial x}(a_k - 0, y, \tau) = \lambda_k \frac{\partial T}{\partial x}(a_k + 0, y, \tau);$	$\sigma_x^{k-1}(a_k - 0, y) = \sigma_x^k(a_k + 0, y);$
	$\tau_{xy}^{k-1}(a_k - 0, y) = \tau_{xy}^k(a_k + 0, y), \quad (7)$

где λ_k – теплопроводность k -го слоя; a_k – толщина k -го слоя; v_j – компоненты перемещений в k -ом слое.

Для поверхностных слоёв, имеющих структурные и технологические неоднородности, условия разрывности решения в зависимости от типа дефекта будут:

на включениях	на трещиноподобных дефектах
$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \sigma_x \rangle \neq 0;$	$\langle \sigma_x \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0;$
$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \tau_{xy} \rangle \neq 0;$	$\langle \tau_{xy} \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0, \quad (8)$

где $\langle \bar{v} \rangle, \langle \bar{v} \rangle, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$ – скачки компоненты смещений и напряжений.

Предельно равновесное состояние деформируемого поверхностного слоя оценивалось классическими критериями прочности.

Из имеющихся критериев разрушения, учитывающих локальные физико-механические свойства неоднородных материалов, наиболее приемлемыми для данного случая являются критерии силового подхода, связанные с использованием понятия коэффициента интенсивности напряжений (КИН). Когда нагружение приводит к тому, что интенсивность напряжений K_I становится равной предельному значению K_{IC} , то трещиноподобный дефект превращается в магистральную трещину.

Моделирование влияния исходной кусочной однородности шлифуемых материалов (деталей с покрытиями) на термомеханические процессы осуществляется методом разрывных решений [7]. Под ними понимаются такие решения, которые удовлетворяют уравнениям теплопроводности Фурье и упругости Ламе всюду, кроме границ дефектов. При переходе через границу поля смещений и напряжений терпят разрывы I рода, т.е. появляются их скачки $\langle v \rangle, \langle v \rangle, \dots, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$.

Решение тепловой задачи (1) – (4), (5) – (8) осуществляется с помощью интегральных преобразований Фурье по переменной y и Лапласа по τ к функции $T(x, y, \tau)$ в I ($k=0$) слое, которые описываются в интегральной форме в виде:

$$T_0(x, y, \tau) = \int_{-a}^a d\tau \int_0^\tau \chi(t - \tau, x, y - \eta) dt, \quad (9)$$

$$\text{где } q(t, x, y - \eta) = \frac{1}{2\pi i} \int_r K_p^m(y - \eta, x) e^{pt} dp, \quad \chi(y, \tau) = \sum_{m=0}^{\infty} \chi_m(y) 2e^{-\tau} L_m(2\tau), \quad L_m(2\tau) -$$

полиномы Лаггера; $K_p^m(y - \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t\beta(y-\eta)}}{l_{m\beta p}} d\beta$, $l_{m\beta p}$ – выражение, учитывающее теплофизические свойства слоёв ($k = 0 - m$), их толщину и граничные условия.

Напряженно-деформированное состояние слоистой полуплоскости также оценивается методом разрывных решений. Границы раздела $x = a_k$ ($k = 0$) рассматриваются как дефекты, при переходе через которые терпят разрывы поля смещений и напряжений.

Построение разрывных решений уравнений Ламе с заданными скачками осуществляется с помощью функций Треффца [7]:

$$\bar{v} = \psi_1 + (x - a)\psi'_0, \quad \bar{v} = \psi_2 + (x - a)\psi'_0; \quad \psi'_0 = \frac{\psi'_1 + \psi'_2}{3 - 4\eta}, \quad e = \psi'_1 + \psi''_2 + \psi'_0, \quad (10)$$

$$\text{где } \Delta\psi_0(x, y) = 0, \Delta\psi_j(x, y) = b_k^t T^{(j)}, (j = 1, 2) \quad \text{“’”} \quad \frac{\partial}{\partial x}, \quad \text{“”} \quad \frac{\partial}{\partial y}.$$

Напряжения находят по формулам:

$$\sigma_x = (1 - \mu)\psi'_0 + \psi'_1 + (x - a_k)\psi''_0; \quad \sigma_y = \mu\psi'_0 + \psi'_2 + (x - a_k)\psi''_0 \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \psi_1^2 + 2(x - a_k)\psi'_0 + \psi'_2 + \psi_0'$$

Применение обобщенных преобразований Фурье по переменным x, y к уравнениям (2), (3), (6), (7) с учетом [7] позволяет получить рекуррентные соотношения, связывающие смещения и направления в произвольном слое с напряжениями и смещениями, формирующимися в первом слое под действием нестационарных температурных полей.

Влияние неоднородностей в поверхностном слое сталей и сплавов на интенсивность трещино- и сколообразования при шлифовании исследуется следующим образом. В условиях неравномерного нагрева в поверхностном слое возникают тепловые деформации, которые вызывают температурные напряжения. Под действием этих напряжений, концентрирующихся в местах расположения дефектов, и происходит образование шлифовочных трещин. Математически задача формулируется так. Пусть в упругой

полуплоскости на линиях $\tilde{x}_i = 0$ имеются дефекты $\left| \tilde{y}_i \right| \leq l_i, (i = \overline{1, k})$, при переходе через которые терпят разрывы поля смещений и напряжений:

$$\left\langle \tilde{v}(\tilde{y}) \right\rangle = \tilde{v}_k(-0, \tilde{y}) - \tilde{v}_k(+0, \tilde{y}); \quad \left\langle \tilde{\sigma}_x(\tilde{y}) \right\rangle = \tilde{\sigma}_x^k(-0, \tilde{y}) - \tilde{\sigma}_x^k(+0, \tilde{y}); \quad (12)$$

$$\left\langle \tilde{v}(\tilde{y}) \right\rangle = \tilde{u}_k(-0, \tilde{y}) - \tilde{u}_k(+0, \tilde{y}); \quad \left\langle \tilde{\tau}_{xy}(\tilde{y}) \right\rangle = \tilde{\tau}_{xy}^k(-0, \tilde{y}) - \tilde{\tau}_{xy}^k(+0, \tilde{y})$$

В зависимости от типа дефектов реализуются граничные условия (8) первого типа либо второго. Будем различать левый (находящийся при движении по L_i в положительном направлении) и правый берега дефектов, обозначая относящиеся к ним величины индексами “+” и “-”. Решение задачи термоупругости (2), (3), (6), (8) для поверхностного слоя, содержащего указанные дефекты при условии, что температурное поле описывается выражением (9) сводится к решению системы сингулярных интегральных уравнений

$$\text{относительно скачков смещений } \left\langle \tilde{u}'_k(\tilde{y}) \right\rangle, \left\langle \tilde{v}'_x(\tilde{y}) \right\rangle - \text{ в случае трещин, и скачков напряжений } \left\langle \tilde{\sigma}_x^k(\tilde{y}) \right\rangle,$$

$$\left\langle \tilde{\tau}_{xy}^k(\tilde{y}) \right\rangle \text{ в случае включений: } \int_{-l_1}^{l_1} \frac{\tilde{u}'_1(\eta)}{y - \eta} d\eta + \sum_{k=1}^S \int_{-l_k}^{l_k} [\left\langle \tilde{u}'_1(\eta) \right\rangle K_k^{(1)}(d, y - \eta) + \left\langle \tilde{v}'_1(\eta) \right\rangle M_k^{(1)}(d, y - \eta) d\eta] = F_1.$$

В этих формулах приняты следующие обозначения: $K_k^{(i)}(d, y - \eta); M_k^{(i)}(d, y - \eta)$ – ядра, отражающие размещение и ориентацию дефектов, относительно глобальных координат XOY ; d^* – параметр, характеризующий физико-механические свойства материала поверхностного слоя.

Вычисление регулярных интегралов производится по квадратурным формулам Гаусса-Чебышева, а сингулярных интегралов с ядрами Коши – методом ортогональных многочленов [7]. При этом получаем систему алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов. Окончательно, находим напряжения и смещения в поверхностном слое с дефектами l_k по формулам:

$$\begin{aligned} \|\sigma_x, \tau_{xy}, u', v'\| &= \sum_{k=1}^n \int_{-l_k}^{l_k} \|R_k^{(m)}[(x-\xi), y] P^{(i)}(\xi) d\xi, \quad R_k^m(x, y) = -(\alpha_k)^m v_k^{(m)} [K_n^{(S_k-m)}], \quad m=0, 1; \\ K_n^{(0)}(x, y) &= \frac{(-sqny)^n |y|}{4\pi(x^2 + y^2)} \left[\frac{y^2 - x^2}{y^2 + x^2} - (n-1) \right], \quad n=0, 1, 2, \dots; \\ K_n^{(1)}(x, y) &= \frac{(-sqny)^n x}{4\pi(x^2 + y^2)} \left[\frac{2y^2}{x^2 + y^2} - (n-1) \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Так, исследование интенсивности напряжений в вершинах дефекта длиной $2l$, расположенного на глубине σ^* , когда на поверхности тела ($x=0, |y| \leq a^*$) задан тепловой поток q , позволило установить предельное значение этого потока q^* , при котором указанный дефект начинает развиваться в магистральную трещину:

$$q^* = \frac{2\sqrt{3}\lambda(1-\nu)K_{4C}}{\alpha_2 E l \sqrt{\pi} \sigma^*}. \quad (14)$$

Для бездефектной обработки сталей и сплавов, имеющих трещиноподобные дефекты и включения, при выборе режимов обработки и характеристик инструмента следует руководствоваться предельными значениями теплового потока [8, 9], формирующегося при шлифовании, чтобы наследственные дефекты не вышли из равновесного состояния.

Из установленных функциональных связей между кинетикой термомеханических явлений, наследственной неоднородностью поверхностного слоя и показателями качества шлифуемых изделий следует, что тепловой поток является основным критерием предельного равновесия трещиноподобных дефектов [9].

Изучение роли неоднородности структуры покрытий в механизме снижения трещиностойкости проводилось с помощью установленного теоретическим путем критерия локального разрушения в виде следующего неравенства:

$$l_0 < \frac{Da\lambda^2 v_q^u K_c^2}{\pi^2 \left[c v_{kp} G(1+\nu) a_t \left(1 - 2\chi p \left(\frac{v_q \sqrt{Dt}}{a\tau} \right) \right) \right]}, \quad (15)$$

где v_{kp}, v_q, t – режимы шлифования; D, C – параметры инструмента; λ, a – теплофизические характеристики обрабатываемого покрытия; K_C – трещиностойкость данного покрытия; G – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; a_t – температурный коэффициент линейного расширения; l – характерный линейный размер структурного параметра (дефект структуры).

Разработка технологических критериев для управления процессом бездефектного шлифования осуществляется на базе установленных функциональных связей между физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов и основными технологическими параметрами.

Обработку материалов и сплавов без шлифовочных трещин можно обеспечить, если ограничить формирующиеся в зоне интенсивного охлаждения напряжения предельными значениями:

$$\sigma_{\max}(x, \tau) = 2G \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_t T_k \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) \leq [\sigma_{\text{лч}}]. \quad (16)$$

В случае доминирующего влияния наследственной неоднородности на интенсивность образования шлифовочных трещин, необходимо пользоваться критериями, в структуру которых входят детерминированные связи технологических параметров и свойства самих неоднородностей. В качестве таких можно использовать ограничение коэффициента интенсивности напряжений:

$$K = \frac{1}{\pi\sqrt{l}} \int_{-e}^e \sqrt{\frac{l+t}{l-t}} \{\sigma_x, \sigma_y\} dt \leq K_{Ic} \quad (17)$$

или обеспечение с помощью управляющих технологических параметров предельного значения теплового потока, при котором сохраняется равновесие структурных дефектов:

$$q^* = \frac{P_z \nu_{kp} \alpha_s}{\sqrt{D t_{ул}}} \leq \frac{\sqrt{3} \lambda K_{Ic}}{H \sqrt{\pi} \sigma} \quad (18)$$

Условия бездефектного шлифования можно реализовать, используя информацию о структуре обрабатываемого материала. Так, в случае преобладающего характера структурных несовершенств длиной $2l$, их регулярного расположения относительно зоны контакта инструмента с деталью, можно в качестве критериального соотношения использовать условие равновесия дефекта в виде:

$$l_0 < \frac{K_C^2}{\chi [G T_k (1 + \nu) \alpha_t]^C} \quad (19)$$

В этой формуле технологическая часть содержится в связи величины контактной температуры T_k с условиями шлифования.

Приведенные неравенства дают увязку предельных характеристик температурного и силового полей с управляющими, технологическими параметрами. Они задают область сочетаний этих параметров, удовлетворяющих полученным термомеханическим критериям. При этом учитываются свойства обрабатываемого материала и гарантируются обеспечение требуемого качества изделий.

Выводы

В результате выполненных исследований решена научно-техническая проблема, состоящая в установлении расчетных зависимостей по определению влияния наследственных дефектов, сформированных от предшествующих операций на трещиностойкость поверхностного слоя при шлифовании.

Разработана математическая модель, описывающая термомеханические процессы в поверхностном слое при шлифовании деталей из материалов и сплавов с учетом их неоднородностей, влияющих на формирование шлифовочных трещин. При этом впервые получены расчетные зависимости между критерием трещиностойкости и основными управляющими технологическими параметрами. По известным характеристикам наследственных дефектов определены предельные значения теплового потока, обеспечивающие требуемое качество шлифуемых поверхностей.

Разработана методика выбора технологических условий бездефектной обработки материалов и сплавов с учетом накопленных повреждений и неоднородностей наследственного происхождения, особо предрасположенных к трещинообразованию в процессе шлифования. Это способствует снижению брака на финишных операциях и повышению эксплуатационных свойств деталей машин.

Список использованной литературы

1. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – К.; Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
3. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности] / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
4. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность в машиностроении. / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Мн.: Наука и техника, 1977. – 256 с.
5. Усов А.В. Возникновение трещин при алмазно-абразивной обработке сталей / А.В. Усов, Г.Д. Григорьян // Сверхтвердые материалы. – 1982. – № 6. – С. 43–55.
6. Усов А.В. Причины появления дефектов при шлифовании магнито-твердых сплавов / А.В. Усов, Е.А. Кормилицына, Ф.М. Сальковский // Технология электротехнического производства. – 1982. – Вып. 4. – С. 1–3.
7. Попов Г.Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов, разрезов, тонких включений и подкреплений / Г.Я. Попов. – М.: Наука, 1982. – 344 с.
8. Подзей А.В. Шлифовочные дефекты и пути их устранения / А.В. Подзей, А.В. Якимов // Вестник машиностроения. – 1972. – № 3. – С. 41–43.
9. Усов А.В. Повышение эффективности процесса бездефектного шлифования материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию: дис. ... д-р. техн. наук / Анатолий Васильевич Усов. – К., 1991. – 426 с.