

УДК 536:621.9

А. В. УСОВ, д-р техн. наук,
С. Г. СМІРНИЙ, Одеса, Україна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ И СПЛАВОВ, СКЛОННЫХ К ЭТОМУ ВИДУ ДЕФЕКТОВ

В статті запропоновано аналіз причин тріщиноутворення при шліфуванні матеріалів та сплавів, схильних до цього виду дефектів. Показано, що інтенсивність тріщиноутворення визначається наявністю різного роду неоднорідностей, які виникають у поверхневому шарі в залежності від технології виготовлення деталі. Одержані функціональні зв'язки технологічних параметрів і тріщиноутворення при шліфуванні матеріалів, схильних до цих дефектів.

В статье 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. Получены функциональные связи технологических параметров с условиями трещинообразования при шлифовании материалов, предрасположенных к этому виду дефектов.

The article presents an analysis of the causes of crack formation in grinding of materials and alloys are prone to this type of defects. It is shown that the intensity of cracking is largely determined by the presence of various inhomogeneities that occur in the surface layer during the manufacturing details. The obtained functional relationships of process parameters with the conditions of crack formation in grinding of materials that are predisposed to this type of defects.

1. 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].

Установление связей между важнейшими эксплуатационными свойствами деталей (длительная прочность, контактная жесткость, магнитные свойства и др.) и технологическими параметрами – режимами обработки, характеристиками инструмента, микротвёрдостью, наличием прижогов, микротрещин, сколов, глубиной распространения упрочненного слоя представляет собой одну из важнейших задач технологии машиностроения [2, 3, 4].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В фундаментальных работах [1–4] в качестве основного показателя физико-механического состояния обрабатываемых поверхностей используется теплонапряженность процесса шлифования.

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

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.

Имеющиеся в настоящее время модели тепловых процессов алмазно-абразивной обработки получены в предположении однородности шлифуемых материалов и не учитывают наличие дефектов

технологической наследственности изделий. Изучению причин образования шлифовочных дефектов-трещин - посвящены работы [2, 3,5,6,7, 8, 9] и др. в которых напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя детали рассматривается, в основном, с качественной стороны или оценивается в каждом отдельном случае экспериментальными методами.

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.

При постановке задачи о повышении качества шлифования деталей возникает проблема оценки влияния неоднородностей, выбора режимов и характеристик инструмента, смазочно охлаждающей среды использование которых исключает прижого- и трещинообразование на обрабатываемых поверхностях. В связи с этим необходимо разработать предпосылки для оптимизации термомеханического состояния поверхностного слоя с учетом его дефектности, исключаящие возникновение шлифовочных дефектов типа трещин и прижогов.

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка методов и нормативных рекомендаций по технологическим методам снижения шлифовочных трещин при обработке деталей из материалов и сплавов, поверхностный слой которых имеет наследственные неоднородности структурного или технологического происхождения .

Для достижения поставленной цели были поставлены 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;

– разработать рекомендации по выбору технологических условий бездефектной обработки шлифованием изделий из материалов, особо предрасположенных к трещинообразованию.

4. 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. 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 кон тура наследственных аустенитных зёрен, карбидной строчечности, неметаллических включений, раковин, флокенов и др. 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).

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), содержит [6, 7]:

Уравнение нестационарной теплопроводности

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

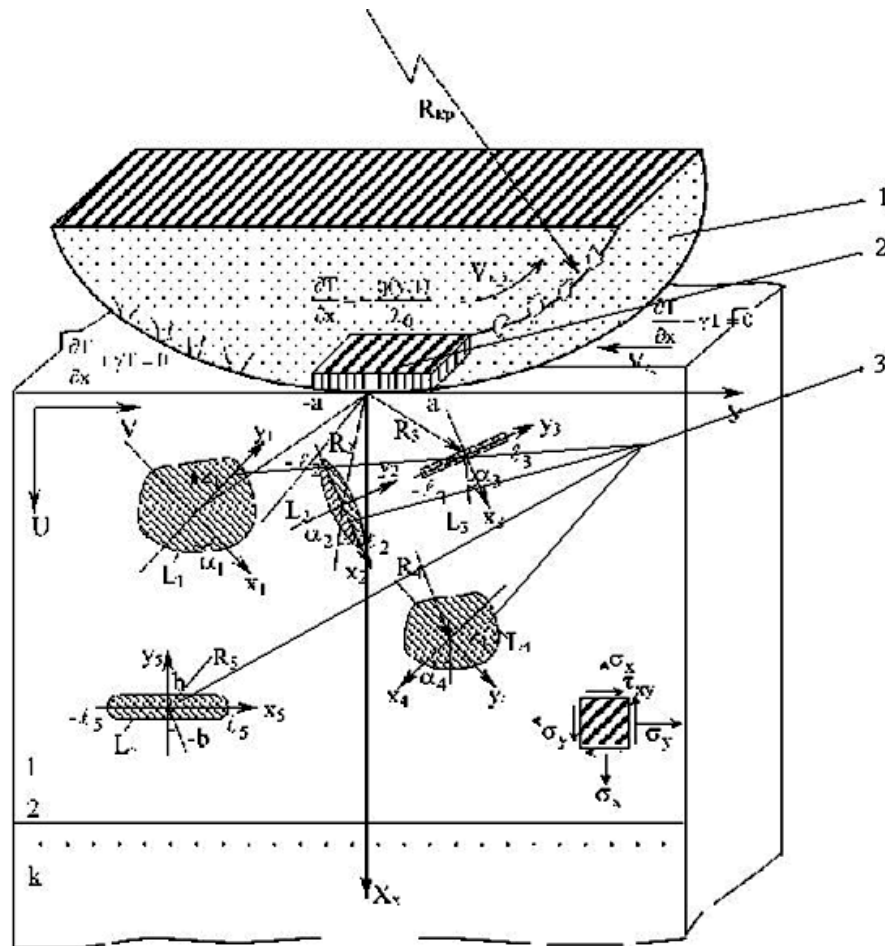


Рисунок 1 – Расчетная схема для моделирования влияния технологических неоднородностей на трещинообразование при шлифовании материалов, склонных к данным дефектам:

- 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 ($k = 1, 2, \dots$)

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; v, 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

$$T^{k-1}(a_k - 0, y, \tau) = T^k(a_k + 0, y, \tau)$$

$$\lambda_{k-q} \frac{\partial T^{k-1}}{\partial x}(a_k - 0, y, \tau) = \lambda_k \frac{\partial T^k}{\partial x}(a_k + 0, y, \tau)$$

для деформационных полей

$$v_j^{k-1}(a_k - 0, y) = v_j^k(a_k + 0, y)$$

$$\sigma_x^{k-1}(a_k - 0, y) = \sigma_x^k(a_k + 0, y);$$

$$\tau_{xy}^{k-1}(a_k - 0, y) = \tau_{xy}^k(a_k + 0, y) \quad (7)$$

где λ_k - теплопроводность k -го слоя; α_k - толщина k -го слоя; v_j^k - 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

$$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \sigma_x \rangle \neq 0$$

$$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \tau_{xy} \rangle \neq 0$$

на трещиноподобных дефектах

$$\langle \sigma_x \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0$$

$$\langle \tau_{xy} \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0 \quad (8)$$

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 трещинообразный дефект превращается в магистральную трещину.

Моделирование влияния исходной кусочной однородности шлифуемых материалов /деталей с покрытиями/ на термомеханические процессы осуществляется методом разрывных решений [10]. 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:

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

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

полиномы Лаггера; $K_p^m(y - \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-t\beta(y-\eta)}}{l_{m,\beta p}}$, $l_{m,\beta p}$ – 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:

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

где: $\Delta\psi_0(x, y) = 0, \Delta\psi_j(x, y) = b'_k T^{(j)}$, ($j=1,2$) “ $'$ ” $\frac{\partial}{\partial x}$, “ $''$ ” $\frac{\partial}{\partial y}$

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 [10] 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 $|\tilde{y}| \leq l_i, (i=\overline{1,k})$, при переходе через которые терпят разрывы поля смещений и напряжений:

$$\begin{aligned} \langle \tilde{v}(\tilde{y}) \rangle &= \tilde{v}_k(-0, \tilde{y}) - \tilde{v}_k(+0, \tilde{y}); & \langle \sigma_x^k(\tilde{y}) \rangle &= \sigma_x^k(-0, \tilde{y}) - \sigma_x^k(+0, \tilde{y}); \\ \langle \tilde{v}'(\tilde{y}) \rangle &= \tilde{u}_k(-0, \tilde{y}) - \tilde{u}_k(+0, \tilde{y}); & \langle \tau_{xy}^k(\tilde{y}) \rangle &= \tau_{xy}^k(-0, \tilde{y}) - \tau_{xy}^k(+0, \tilde{y}). \end{aligned} \quad (12)$$

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 относительно скачков смещений $\langle \tilde{u}'_k(\tilde{y}) \rangle$, $\langle \tilde{v}'_x(\tilde{y}) \rangle$ – в случае трещин, и скачков напряжений $\langle \sigma_x^k(\tilde{y}) \rangle$, $\langle \tau_{xy}^k(\tilde{y}) \rangle$ в случае включений:

$$\int_{-l_i}^{l_i} \frac{\langle \tilde{u}'_1(\eta) \rangle}{y-\eta} d\eta + \sum_{k=1-l_k}^S \int_{-l_k}^{l_k} [\langle \tilde{u}'_1(\eta) \rangle K_k^{(1)}(d, y-\eta) + \langle \tilde{v}'_1(\eta) \rangle M_k^{(1)}(d, y-\eta) d\eta] = F_1; \quad (13)$$

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

Вычисление регулярных интегралов в (13) производятся по квадратурным формулам Гаусса-Чебышева, а сингулярных интегралов с

ядрами Коши – методом ортогональных многочленов [10]. При этом получаем систему алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов. Окончательно, находим напряжения и смещения в поверхностном слое с дефектами l_k по формулам:

$$\|\sigma_x, \tau_{xy}, u', v'\| = \sum_{k=1-l_k}^n \int_{-l_k}^{l_k} \|R_k^{(m)}[(x-\xi), y]\| P^{(i)}(\xi) d\xi, R_k^m(x, y) = -(\alpha_k)^m \nu_k^{(m)} [K_n^{(S_k-m)}], m=0,1,$$

$$K_n^{(0)}(x, y) = \frac{(-sqny)^n |y|}{4\pi(x^2 + y^2)} \left[\frac{y^2 - x^2}{y^2 + x^2} - (n-1) \right], n=0,1,2...$$

$$K_n^{(1)}(x, y) = \frac{(-sqny)^n x}{4\pi(x^2 + y^2)} \left[\frac{2y^2}{x^2 + y^2} - (n-1) \right]. \quad (14)$$

Наибольший интерес представляет поведение напряжений в окрестности вершин дефектов типа трещин, остроконечных включений, структурных несовершенств, т.е. особенностей напряжений при $y \rightarrow \pm l_k$. Характер поля напряжений в непосредственной близости от конца дефекта, полученного в рамках классической теории упругости, определяется коэффициентами интенсивности напряжений $K_I + iK_{II}$.

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:

$$q^* = \frac{2\sqrt{3}\lambda(1-\nu)K_{4C}}{\alpha_2 El \sqrt{\pi l} \sigma^*}. \quad (15)$$

Для бездефектной обработки сталей и сплавов, имеющих трещиноподобные дефекты и включения, при выборе режимов обработки и характеристик инструмента следует руководствоваться предельными значениями теплового потока [11, 12], 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 [11, 12].

Влияние конструктивных параметров инструмента на термомеханическое состояние поверхностного слоя определялось с помощью модельной задачи (1), (4), и граничных условий в виде:

$$q(y, \tau) = \frac{c\sqrt{\tau}}{\lambda} [H(y) - H(y - 2a^*)] \sum_{k=0}^n \sigma(y + kl - v_{kp}\tau) \quad (16)$$

где $H(y)$ - функция Хевисайда; $\sigma(y)$ - дельта-функция Дирака; n - количество зерен, проходящих в зоне контакта за время $\tau = \frac{\sqrt{\pi t_{\text{шт}}}}{v_{kp}}$; λ - теплопроводность материала изделия; $c\sqrt{\tau}$ - тепловой поток от единичного зерна; $v_g, v_{kp}, t_{\text{шт}}$ режимы шлифования, $2a^*$ - длина дуги контакта круга с деталью; l^* - расстояние между режущими зёрнами. Получены теоретически и подтверждены экспериментально максимальные значения мгновенной температуры T_M , от единичных зерен к постоянной составляющей $-T_K$, которые использованы в дальнейшем в качестве критериальных при прогнозировании условий образования дефектов типа прижогов и глубины их залегания.

5. Рекомендации по методике бездефектной технологии шлифования изделий из материалов, особо предрасположенных к трещинообразованию

Апробация теоретических результатов по обеспечению качества шлифуемых поверхностей, содержащих неоднородности проводилась на материалах, склонных к трещинообразованию и существенно отличающихся между собой физико-механическими свойствами - это изделия с покрытиями, магнитотвердые сплавы и высокопрочные стали.

Широко применяемые в машиностроении покрытия рабочих поверхностей деталей - молибденовые, плазменные, боридные - характеризуются очень высокой твердостью и хрупкостью. При обработке

этих покрытий шлифованием самыми распространенными дефектами являются трещины, сколы, срывы [12].

Существующие модели напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя деталей с покрытием являются не полными, в связи с принятием при их построении таких допущений как гипотеза об однородности самого покрытия [2]. В то время, как анализ изломов деталей с покрытиями показывает, что местами зарождения трещин являются микронеоднородности покрытий, обусловленные как характером самих покрытий, так и технологией их нанесения.

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

$$l_0 < \frac{Da\lambda^2 v_q^u K_c^2}{\pi^2 \left[c v_{kp} G(1+\nu) a_t \left(1 - 2\chi p \left(\frac{v_q \sqrt{Dt}}{a\tau} \right) \right) \right]}, \quad (17)$$

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).

Для плазменных покрытий на основе карбид титана TiC в качестве параметра l выбирались размеры воздушных пор, величина которых регулируется скоростью транспортирующей струи.

Исследование влияния технологической наследственности на процесс трещинообразования при шлифовании магнитотвердых сплавов проводилось на основе полученных критериев, отражающих особенности метода плавки, режимов ТО, ТМО и формирующейся при этом морфологии самих сплавов.

Качество обрабатываемых поверхностей будет обеспечено, если с помощью управляющих технологических параметров подобрать такие режимы обработки, смазочно-охлаждающие среды и характеристики

инструмента, что текущие значения температуры шлифования $T(x, y, \tau)$ и теплового потока $q(y, \tau)$, напряжений $\sigma(M)$ и сил шлифования P_y, P_z коэффициента K_k будут превосходить своих предельных значений [12].

Реализация системы ограничивающих неравенств по величинам самой температуры и глубине её распространения в виде:

$$T(x, y, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right)^{\gamma_2} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} f(x, y, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_M \quad (18)$$

$$T([h], 0, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right)^{\gamma_2} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \psi(x, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_{c.n.} \quad (19)$$

$$T_k(0, y, \tau) = \frac{Cv_{kp}}{\pi\lambda l \sqrt{v_g}} \int_{a-e}^{\tau} \int_{-e}^e \frac{\chi(\eta, t) e^{\frac{(y-\eta)^2}{4(\tau-t)}}}{2\sqrt{\pi(\tau-t)}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi(\tau-t)}} + \gamma e^{\gamma^2(\tau-t)} [1 + \Phi(\gamma\sqrt{\tau-t})] \right\} d\eta dt \leq [T] \quad (20)$$

$$T_k^{\max}(L, 0) = \frac{Cv_{kp}\alpha}{\lambda l v_g^2} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_g \sqrt{Dt_{un}}}{\alpha}\right) \right] \leq [T]. \quad (21)$$

позволяет избежать образования шлифовочных прижогов и может послужить основой для проектирования циклов шлифования по тепловому критерию.

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

$$\sigma_{\max}(x, \tau) = 2G \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_t T_k \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) \leq [\sigma_{лч}]. \quad (22)$$

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:

$$K = \frac{1}{\pi\sqrt{l}} \int_{-e}^e \sqrt{\frac{l+t}{l-t}} \{\sigma_x, \sigma_y\} dt \leq K_{lc} \quad (23)$$

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

$$q^* = \frac{P_z \nu_{kp} \alpha_s}{\sqrt{Dt_{uni}}} \leq \frac{\sqrt{3} \lambda K_{lc}}{Hl \sqrt{\pi l} \sigma}. \quad (24)$$

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:

$$l_0 < \frac{K_c^2}{x[GT_k(1+\nu)\alpha_t]^c}. \quad (25)$$

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

На основе полученных критериальных соотношений (18)–(25), построен алгоритм обеспечения качества поверхностного слоя деталей при шлифовании с учётом максимальной производительности обработки.

6. Вывод

Изучен механизм формирования дефектов в поверхностном слое деталей из материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию при обработке их шлифованием с учетом предшествующих операций и возникающих при этом наследственных неоднородностей. Установлено, что шлифовочные трещины имеют тепловую природу, поэтому в качестве критериев бездефектной обработки необходимо выбирать тепловые критерии. 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.

Список использованных источников: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. Jacobus, K. Machining-Induced residual stress: Experimentation and modeling / K. Jacobus, R. E. Devor, S. G. Kapoor // Transaction of the ASME: Journal of manufacturing science and engineering. – 2000. – Vol. 122, Issue 1. – P. 20–31. doi: 10.1115/1.538906. 6. Усов, А. В. Возникновение трещин при алмазно-абразивной обработке сталей / А. В. Усов, Г. Д. Григорьян. – Ж. "Сверхтвердые материалы", № 6, К., Наукова думка, 1982. – С. 43–55. 7. Усов, А. В. Причины появления дефектов при шлифовании магнито-твердых сплавов / А. В. Усов, Е. А. Кормилицына, Ф. М. Сальковский // Ж. Технология электротехнического производства. – 1982. – Вып. 4.–С. 1-3. 8. Усов, А. В. Анализ условий возникновения шлифовочных трещин и пути их устранения / А. В. Усов, А. В. Якимов, Г. Д. Григорьян // Ж. Вестник машиностроения. – 1980. – № II. – С. 27-31. 9. Худобин, Л. В. Технология обработки высокоэффективных магнитных сплавов / Л. В. Худобин, А. И. Бударин, Ф. М. Сальковский. – М., Энергия, 1979.– 184 с. 10. Попов, Г. Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов, разрезов, тонких включений и подкреплений / Г. Я. Попов. – М.: Наука, 1982. – 344 с. 11. Подзей, А. В. Шлифовочные дефекта и пути их устранения / А. В. Подзей, А. В. Якимов // Ж. "Вестник машиностроения". – 1972. – № 3. – С. 41-43. 12. Усов, А. В. Повышение эффективности процесса бездефектного шлифования материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию : Дис. ... д-р. техн. наук / А. В. Усов. – К., 1991. – 426 с.

Bibliography (transliterated): 1. Jakimov, A. V., Slobodynik, P. T., Usov, A. V. (1991). The physics of machining. Kiwv, Odessa, Libid, 240. 2. Resnikov, A. N. (1981). Physics of thermal processes of tooling of materials. Moscow: "Maschinostroenie", 279. 3. Sipaylov, V. A. (1978). Thermal processes at polishing and management by quality of surface. Moscow: "Maschinostroenie", 167. 4. Jasherichin, P. I., Rigov, E. V., Averchenkov, V. I. (1977). Technological heredity is in the structure of machines. Mn. "Scitech", 256. 5. Jacobus, K., Devor, R. E., Kapoor, S. G. (2000). Machining-Induced residual stress: Experimentation and modeling. Transaction of the ASME: Journal of manufacturing science and engineering, 122

(1), 20–31. doi: 10.1115/1.538906 6. *Usov, A. V., Grigorjn, G. D.* (1982). Origin of cracks at diamond-abrasive treatment of metals. J "Adamantine materials", 6, 43–55. 7. *Usov, A. V., Kormilicina, E. A., Salkovskiy, F. M.* (1982). Reasons of appearance of defects at polishing of magnetic carboloies. J. Technology of electrical engineering production, 4, 1–3. 8. *Usov, A. V., Jakimov, A. V., Grigorjn, G. D.* (1980). Analysis of terms of origin of polishing cracks and way of their removal. J. Announcer of engineer, II, 27–31. 9. *Chudobin, L. V., Budarin, A. I., Salkovskiy, F. M.* (1979). Technology of treatment of high-efficiency magnetic alloys. Publishing house Saratov Universitet, 128. 10. *Popov, G. J.* (1982). The elastic stress concentration near stamps, cuts, thin inclusions and reinforcements. Moscow: Nauka, 344. 11. *Podsey, A. V., Jakimov, A. V.* (1974). Polishing defects and ways of their removal. J. "Maschinostroenie", 41–43. 12. *Usov, A.* (1991). Improving the efficiency of the process defect-free grinding of materials and alloys that are prone to crack formation. Kiev, 324.