

УДК 536.621.9

А.В. Усов, профессор, д-р техн. наук,

С.Г. Смирный, аспирант

Одесский национальный политехнический университет,

пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044

usov-a-v@mbel.opu.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ МЕТАЛЛОВ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ

Анализируются причины трещинообразования при шлифовании стали и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию. Предлагаются критерии выбора режимов и характеристик инструментов, способствующих снижению дефектов типа трещин в поверхностном слое изделий.

Ключевые слова: *шлифование, трещинообразование, режимы обработки, характеристики инструментов, моделирование.*

Отличительной особенностью операции шлифования является выделение большого количества теплоты, основная часть которой воспринимается обрабатываемой деталью и вызывает на отдельных ее участках структурные изменения – прижоги. Эти дефекты способствуют уменьшению исходной твердости поверхности, образованию растягивающих остаточных напряжений, снижают контактную выносливость, усталостную прочность деталей.

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 [1]

Выделяют следующие типы трещин при шлифовании материалов, предрасположенных к такому виду дефектов:

- сетка поверхностных трещин, залегающих на относительно небольшую глубину (до 0,5 мм – 1,5 мм);
- магистральные глубинные трещины (1-10 мм),
- подповерхностные замкнутые трещины;
- пограничные трещины, формирующиеся при обработке кусочно-однородных материалов (детали с покрытиями).

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

Шлифовочные дефекты на обработанных поверхностях деталей резко снижают /иногда до 30 раз/ их эксплуатационные показатели и являются недопустимыми.

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.

Качество поверхностного слоя формируется под действием термомеханических явлений, сопровождающих финишные операции. Поэтому в качестве основного показателя физико-механического состояния обрабатываемых поверхностей используется теплонпряженность алмазно-абразивной обработки. На основании разработанных моделей температурных полей изучаются закономерности образования дефектов типа прижогов и технологические возможности их устранения в зависимости от теплофизических свойств обрабатываемых материалов, режимов шлифования, конструкции и характеристик применяемых инструментов.

Предрасположенность магнитных сплавов к трещинообразованию при обработке их шлифованием многие исследователи связывают с особенностями их магнитной и кристаллической структуры, предназначенной для получения высоких магнитных свойств. Отсутствие каких-либо количественных связей трещиностойкости магнитов с другими свойствами не позволяет однозначно пользоваться имеющимися рекомендациями по бездефектной обработке шлифованием. Имеются исследования влияния структурных превращений в сталях на образование шлифовочных трещин, согласно которым наличие большого количества аустенита, в подповерхностном слое деталей приводит к образованию растягивающих напряжений, которые реализуются в виде хрупких трещин.

Структурные превращения не могут быть “самостоятельной” причиной возникновения шлифовочных трещин, так как структурные напряжения, достигающие разрушающих значений,

формуються на протязі значительного проміжку часу. Шлифування характеризується коротковременністю, великими швидкостями нагріву і охолодження, при яких структурні зміни незначительні, а термомеханічні напруження досягають граничних значень.

Механізм утворення тріщин в поверхневому шарі деталей з покриттями пояснюють дією тимчасових розтягуючих температурних напружень, перевищують граничні значення, а відшарування покриття від основного металу – дією залишкових напружень в поверхневому шарі. Розглядаються при цьому моделі напружено-деформованого стану деталей з покриттями, враховують кусочну неоднорідність (покриття-матриця) і повністю відсутні дослідження впливу неоднорідності самого покриття на механізм дефектоутворення.

Феноменологічний підхід в вивченні причин тріщиноутворення матеріалів схильних до цього виду дефектів не дозволяє відкрити механізм зародження і розвитку шліфовочних тріщин.

Інтенсивність появи тріщин в багатьох визначається наявністю різного роду неоднорідностей, виникаючих в поверхневому шарі по ходу технології виготовлення деталі. Особливо небезпечними з точки зору зародження тріщин, є такі спадкові дефекти, як флокени, острокінцеві порожнини, іноземні включення. Тому побудова теорії тріщиноутворення при шліфуванні з використанням критеріїв механіки руйнування, можливо лише на основі углибоного вивчення механізму зародження тріщин в вершинах концентраторів, якими є металургічні, структурні і технологічні дефекти.

Для управління якістю деталі при шліфуванні необхідно вивчити закономірності формування термомеханічного стану поверхнового шару з урахуванням його неоднорідності. Високопродуктивне бездефектне шліфування матеріалів, чутливих до тріщиноутворення, необхідно здійснювати з урахуванням спадкових дефектів на граничних режимах, при збереженні рівноважного стану, ще не викликаючих утворення тріщин.

При постановці задачі про підвищення якості шліфування деталей виникає проблема оцінки впливу неоднорідностей, вибору режимів і характеристик інструмента, мастильно-охолоджуючої середовища використання яких виключає прижого- і тріщиноутворення на оброблюваних поверхнях. Широка номенклатура матеріалів, підвержених тріщиноутворенню, різноманітність їх властивостей, розміри, орієнтація, розміщення і розподіл спадкових дефектів сприяли тому, що існуючі в даний час рекомендації по усуненню шліфовочних тріщин при обробці поверхностей виробів не можуть бути загальноприйнятими. В зв'язі з цим необхідно розробити передумови для оптимізації термомеханічного стану поверхнового шару з урахуванням його дефектності, виключаючі виникнення шліфовочних дефектів типу тріщин і прижогів.

Рішення вказаних завдань дозволяє не тільки вивчати пряму технологічну задачу фінішної обробки – забезпечення бездефектного шліфування матеріалів, передиспонованих до тріщино- і прижогоутворення, але й перейти до технології виготовлення матеріалів “малочувствительных” до вказаних дефектів за рахунок технологічної спадковості, формуючої структуру, фізико-механічні властивості поверхнового шару, починаючи з способів одержання заготовок і закінчуючи чистовим алмазно-абразивним шліфуванням.

Аналіз масштабних схем взаємодії круга з оброблюваною поверхністю показує, що кривизна круга і деталі в межах зони контакту несуттєво впливають на геометричну схему взаємодії круга з деталлю. Тому при складанні розрахункової схеми (рис. 1) допускається, що деталь типу заготовок може бути представлена в вигляді кусочно-однорідних умовних шарів, з різними властивостями, розташованих на основному матеріалі-матриці, що дозволяє вивчати термомеханічні процеси при шліфуванні деталей з кількома типами покриттів, товщиною Δa_k наносимих на основний матеріал. Така схема передбачає теплові і деформаційні умови сопряження шарів по границях їх розділу — a_k .

Вплив неоднорідностей в вигляді фазових перетворень нестійких структур, міжзеренних плівок, границь контура спадкових аустенітних зерен, карбідної строчечності, неметалічних включень, раковин, флокенів і інших дефектів, виникаючих в поверхневому шарі по ходу технологічного процесу, враховується в моделі наявністю в поверхневому шарі включень і дефектів в вигляді умовних тріщин (рис. 1).

Система рівнянь, визначаючих теплове і напружено-деформоване стан при шліфуванні поверхності деталей з покриттями, верхній шар яких має неоднорідності типу включень і тріщин, містить [2]:

Рівняння нестационарної теплопровідності

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

Рівняння пружинності Ламе в переміщеннях

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

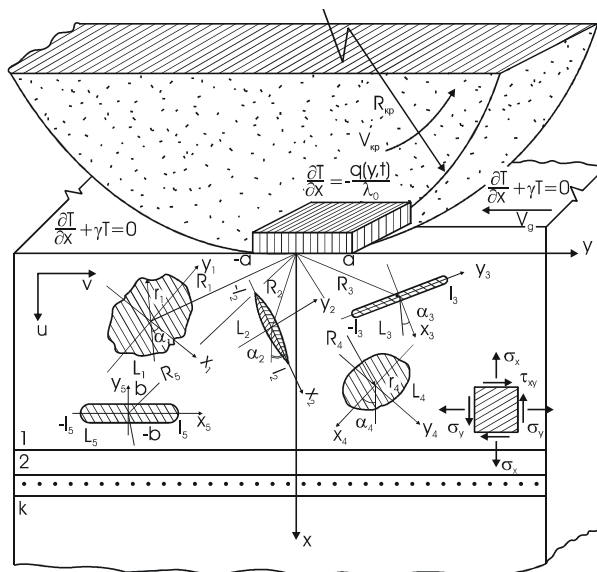


Рисунок 1 – Расчетная схема для моделирования технологических неоднородностей

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

где $T(x, y, \tau)$ – температура в точке с координатами (x, y) и в любой момент времени τ ; a – температуропроводность материала; α – 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 слоев (покрытий):

для температурных полей

$$T(a_{k-1}, y, \tau) = T(a_k, y, \tau)$$

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

для деформационных полей

$$v_j(a_{k-1}, y) = v_j(a_k, y) \quad (7)$$

$$\sigma_x(a_{k-1}, y) = \sigma_x(a_k, y);$$

$$\tau_{xy}(a_{k-1}, y) = \tau_{xy}(a_k, y)$$

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

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

$$\begin{array}{ll} \text{на включениях} & \text{на трещиноподобных дефектах} \\ \langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \sigma_x \rangle \neq 0 & \langle \sigma_x \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0 \\ \langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \tau_{xy} \rangle \neq 0 & \langle \tau_{xy} \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0 \end{array} \quad (8)$$

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 становится равной предельному значению, то трещиноподобный дефект превращается в магистральную трещину.

Моделирование влияния исходной кусочной однородности шлифуемых материалов /деталей с покрытиями/ на термомеханические процессы осуществляется методом разрывных решений [2]. Под ними понимаются такие решения, которые удовлетворяют уравнениям теплопроводности Фурье и упругости Ламе всюду, кроме границ дефектов. При переходе через границы поля смещений и напряжений K_I терпят разрывы I рода, т.е. появляются их скачки $\langle \bar{v} \rangle, \langle \bar{v} \rangle, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$.

Решение тепловой задачи (1), (4), (5), (7) 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 слоев

$/k = 0 - m /$, 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:

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

где “ $\Delta \psi_0(x, y) = 0, \Delta \psi_j(x, y) = b_k^j T^{(j)}, (j=1, 2)$ ” $\frac{\partial}{\partial x}$, “ $\cdot$ ” $\frac{\partial}{\partial y}$.

Напряжения находят по формулам:

$$\sigma_x = (1 - \mu)\psi'_0 + \psi'_1 + (x - a_k)\psi''_0; \quad \sigma_y = -\mu\psi'_0 + \psi'_2 + (x - a_k)\psi''_0; \quad \tau_{xy} = \psi_1^2 + 2(x - a_k)\psi'_0 + \psi_2^2 + \psi_0^2. \quad (11)$$

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 k -м 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:

$$\begin{aligned} \left\langle \tilde{v}(\tilde{y}) \right\rangle &= \tilde{v}_k(-0, \tilde{y}) - \tilde{v}_k(+0, \tilde{y}); \quad \left\langle \tilde{\sigma}_x(\tilde{y}) \right\rangle = \tilde{\sigma}_x^k(-0, \tilde{y}) - \tilde{\sigma}_x^k(+0, \tilde{y}); \\ \left\langle \tilde{v}(\tilde{y}) \right\rangle &= \tilde{u}_k(-0, \tilde{y}) - \tilde{u}_k(+0, \tilde{y}); \quad \left\langle \tilde{\tau}_{xy}(\tilde{y}) \right\rangle = \tilde{\tau}_{xy}^k(-0, \tilde{y}) - \tilde{\tau}_{xy}^k(+0, \tilde{y}). \end{aligned} \quad (12)$$

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, $\left\langle \tilde{u}'_k(\tilde{y}) \right\rangle$, $\left\langle \tilde{v}'_x(\tilde{y}) \right\rangle$ – в случае трещин, и

скачков напряжений, $\left\langle \tilde{\sigma}_x^k(\tilde{y}) \right\rangle$, $\left\langle \tilde{\tau}_{xy}^k(\tilde{y}) \right\rangle$ — в случае включений:

Окончательно, находим напряжения и смещения в поверхностном слое с дефектами l_k по формулам:

$$\begin{aligned} \left\| \sigma_x, \tau_{xy}, u', v' \right\| &= \sum_{k=1-l_k-l_k}^n \int_{l_k}^{l_k} \left\| R_k^{(m)}[(x-\xi), y] \right\| P^{(i)}(\xi) d\xi; \\ R_k^m(x, y) &= -(\alpha_k)^m v_k^{(m)} \left[K_n^{(S_k-m)} \right], m=0,1; \\ K_n^{(0)}(x, y) &= \frac{(-sqny)^n |y|}{4\pi(x^2+y^2)} \left[\frac{y^2-x^2}{y^2+x^2} - (n-1) \right], n=0,1,2,..., K_n^{(1)}(x, y) = \frac{(-sqny)^n x}{4\pi(x^2+y^2)} \left[\frac{2y^2}{x^2+y^2} - (n-1) \right] \quad (13) \\ (\alpha_k)^m R_k^{(m)} &= C_k v_k^{(m)} \left[K_n^{(S_k-m)} \right] - [C_k + \alpha_k(C_k - d_k)] v_k^{(m-2)} \left[K_n^{(S_k-m)} \right], \\ S_i &= \sin^2 \frac{1}{2k\pi}, C_k = \frac{1-\mu_k^2}{E_k}; d_k = \frac{M_k(1-\mu_k)}{E_k};, P^0(y) = \langle \sigma_x(y) \rangle; P^{(1)}y = \langle \tau_{xy}(y) \rangle, -P^{(2)}(y) = \left\langle \tilde{u}'(y) \right\rangle, \\ -P^{(3)}(y) &= \left\langle \tilde{v}'(y) \right\rangle; P^{(j)}(x) = 0; |y| < l_k, j = \overline{0,3}. \end{aligned}$$

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:

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

Взаимное влияние дефектов на интенсивность напряжений сказывается при расположении их на расстоянии друг от друга не более $\sigma^* = \frac{1}{3}$. При этом наименьшая трещиностойкость материала

достигается, если дефекты ориентированы относительно друг друга под углом $\phi = \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{4}$. Геометрия и

свойства α_t^B включений могут создавать условия как для торможения, так и для развития шлифовочных трещин. Если тепловой поток направлен параллельно большей оси эллиптического включения и прямолинейной термоизолированной трещине, то при коэффициенте линейного температурного расширения включения большем, чем основного материала, $\alpha_t^M / \alpha_t^B > \alpha_t^M / \alpha_t^B$ / увеличение жесткости

включения приводит к возрастанию для различных отношений коэффициентов теплопроводности, составляющих материала.

Это приводит к снижению трещиностойкости поверхностного слоя. Для дефектов типа трещин, находящихся в слое с меньшим коэффициентом, ориентация дефекта сильно влияет на величину КИН.

При значительном удалении трещины, расположенной в более жестком слое от линии раздела КИН K_I принимает максимальные значения, когда дефект ориентирован параллельно этой линии, а с приближением трещины к границе раздела максимум K_I достигается, когда она становится перпендикулярной данной границе. Если же трещина находится в менее жестком материале, то максимум K_I достигается, когда трещина перпендикулярна линии раздела. Коэффициент K_{II} становится максимальным при углах между линией раздела слоев, близких к $\frac{\pi}{6}$, независимо от относительной жесткости слоев.

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

Для выяснения роли сил резания и теплонапряженности микрорезания в механизме зарождения трещин с учетом неоднородности обрабатываемого материала определены механические и тепловые характеристики от единичных зерен. Установлено, что тепловой поток от единичного зерна является величиной переменной, определяемой по формуле $q = c\sqrt{\tau}$, где c – коэффициент, учитывающий зернистость, теплофизические свойства металла и режимы резания, τ – время контакта зерна с металлом. Экспериментальные исследования подтверждают установленную закономерность изменения плотности теплового потока от единичных зерен.

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

$$q(y, \tau) = \frac{c\sqrt{\tau}}{\lambda} \left[H(y) - H(y - 2a^*) \right] \sum_{k=0}^n \sigma(y + kl - v_{kp}\tau), \quad (15)$$

где $H(y)$ — функция Хевисайда; $\sigma(y)$ – дельта-функция Дирака; n – количество зерен, проходящих в зоне контакта за время $\tau = \frac{\sqrt{\pi t_{\text{шл}}}}{v_{kp}}$; λ — теплопроводность материала изделия; $c\sqrt{\tau}$ – тепловой поток от

единичного зерна; $v_g, v_{kp}, t_{\text{шл}}$ 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 критерияльных при прогнозировании условий образования дефектов типа прижогов и глубины их залегания.

Исследование влияния микропрерывности на появление шлифовочных трещин показало, что интенсивность трещинообразования незначительно зависит от параметра l_3 . В большей мере здесь сказывается величина теплового потока, зависящая от режимов резания. Макропрерывистость при шлифовании материалов оказывает существенное влияние на трещиностойкость поверхностного слоя. Установлено, что K_{IC} при прерывистом шлифовании значительно меньше, чем при тех же условиях обработки сплошными кругами. Поэтому при шлифовании материалов сплошными и прерывистыми кругами на одних и тех же режимах более интенсивное разрушение обрабатываемой поверхности происходит от сплошного круга. Показано, что эффект повышения трещиностойкости связан не столько с уменьшением интенсивности теплового потока и величины контактной температуры, сколько с тем, что формирующиеся в случае прерывистого шлифования термоупругие напряжения являются сжимающими и, следовательно, менее опасными для развития дефектов, чем растягивающие. Определены рациональные режимы и характеристики инструмента, позволяющие производить обработку материалов без шлифовочных трещин и прижогов на рабочих поверхностях.

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 и теплового потока $q(y, \tau)$, напряжений $\sigma(M)$ и сил шлифования P_y, P_z коэффициента трещиностойкости не будут превосходить своих предельных значений.

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

$$T(x, y, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} f(x, y, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_M, \quad (16)$$

$$T([h], 0, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \psi(x, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_{c.n.}, \quad (17)$$

$$T_k(0, y, \tau) = \frac{Cv_{kp}}{\pi\lambda l \sqrt{v_g}} \times \int_{a-e}^{\tau} \frac{\chi(\eta, t) e^{\frac{(y-\eta)^2}{4(\tau-t)}}}{2\sqrt{\pi(\tau-t)}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi(\tau-1)}} + \gamma e^{\gamma^2(\tau-t)} [1 + \Phi(\gamma\sqrt{\tau-t})] \right\} d\eta dt \leq [T], \quad (18)$$

$$T_k^{\max}(L, 0) = \frac{Cv_{kp}\alpha}{\lambda l v_q^2} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_q \sqrt{Dt_{\text{шл}}}}{\alpha}\right) \right] \leq [T]. \quad (19)$$

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:

$$\sigma_{\max}(x, \tau) = 2G \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_t T_k \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) \leq [\sigma_{\text{лч}}]. \quad (20)$$

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:

$$K = \frac{1}{\pi\sqrt{l}} \int_{-e}^e \sqrt{\frac{l+t}{l-t}} \{\sigma_x, \sigma_y\} dt \leq K_{Ic} \quad (21)$$

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

$$q^* = \frac{P_z v_{kp} \alpha_s}{\sqrt{Dt_{\text{шл}}}} \leq \frac{\sqrt{3}\lambda K_{Ic}}{Hl\sqrt{\pi l \sigma}}. \quad (22)$$

Разработка технологических критериев для управления процессом бездефектного шлифования $T(x, y, \tau)$ осуществлена на базе установленных функциональных связей между физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов и основными технологическими параметрами.

Библиографический список использованной литературы

1. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки: учеб. пособие // А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. — К.; Одесса: Лыбидь, 1991. — 240 с.
2. Усов А.В. Моделирование систем с распределенными параметрами: монография // А.В. Усов, А.Н. Дубров, Д.В. Дмитришин. — Одесса: Астропринт, 2002. — 664 с.

Поступила в редакцию 19.03.2013 г.

Усов А.В., Смирний С.Г. Дослідження причин тріщиноутворення при шліфуванні металів неоднорідної структури

Аналізуються причини тріщиноутворення при шліфуванні сталі і сплавів, які схильні до тріщиноутворення. Пропонуються критерії вибору режимів і характеристик інструментів, які сприяють зниженню дефектів типу тріщин у поверхневому шарі виробів.

Ключові слова: шліфування, тріщиноутворення, режими обробки, характеристики інструментів, моделювання.

Usov A.V., Smirniy S.G. Research the causes of cracking from grinding metal structure inhomogeneity

The causes of cracking in grinding steel and alloys prone to cracking. Proposed criteria for selection of modes and features tools for the reduction of defects such as cracks in the surface layer of the product.

Keywords: grinding, cracking, cutting data, characteristics of the instruments, modeling.