

при деформирующем протягивании изделий с конечной толщиной стенки, а равенство критического контактного давления истинному напряжению при разрыве дает основания предложить новый метод расчета силы протягивания.

Таким образом, проведенные комплексные исследования механики холодного ступенчатого деформирования позволяют не только решать практические задачи для конкретных технологических процессов механической обработки материалов, но и глубже понять физическую сущность сложных явлений, происходящих в пластически деформируемых металлах и их сплавах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. Киев: Наукова думка, 1981. - 288 с.
2. Розенберг А.М., Розенберг О.А., Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. Киев: Наукова думка, 1990.- 320 с.
3. Цеханов Ю.А. Напряженное состояние при деформирующем протягивании толстостенной трубы// Известия вузов. Машиностроение, -1976. - № 5. - С. 153 - 156.
4. Цеханов Ю.А., Балаганская Е.А. Пластичность поверхностного слоя толстостенных трубных заготовок при деформирующем протягивании // Кузнечно-штамповочное производство.- 1997.- № 11 -С.4-6.
5. О влиянии технологических факторов процессов холодного пластического деформирования на шероховатость обработанной поверхности / Ю.А. Цеханов, Е.А. Балаганская, О.А. Розенберг, С.Е. Шейкин: Сб. научн. тр. Киев: АТМ Украины, 1998. С.194 – 201.

Институт сверхтвердых материалов НАН Украины
Воронежская государственная сельскохозяйственная академия

УДК 621.9.011

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

Выполнен расчет параметров поверхностного слоя при обработке материалов резанием.

При изготовлении ответственных деталей изделий, работающих при высоких нагрузках и повышенных температурах, требуется выдерживать заданные параметры качества поверхностного слоя, в частности шероховатость поверхности, глубину и степень наклепа, остаточные напряжения. Решение данной задачи облегчается, если имеются обобщенные теоретические зависимости, устанавливающие взаимосвязь критериев качества поверхностного слоя с параметрами процесса резания. Это позволяет назначить режимы резания исходя из требуемой величины шероховатости, глубины наклепа, уровня остаточных напряжений.

Автором разработана методика расчетного определения остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали применительно к обработке лезвийным инструментом (точение, растачивание, строгание), а также шлифованию. Остаточные напряжения, обусловленные структурными и фазовыми превращениями, не учитывались, что

может быть справедливо при обработке жаропрочных сталей и сплавов, так как влияние их на суммарные остаточные напряжения в этом случае незначительно. Таким образом, задача сводится к расчету температурных остаточных напряжений и остаточных напряжений, обусловленных силовым воздействием на поверхностный слой. Поскольку остаточные напряжения являются упругими, а для сложения последних применим метод наложения, суммарные остаточные напряжения определялись алгебраическим суммированием температурных и силовых остаточных напряжений. Для того, чтобы определить остаточные напряжения от каждого фактора в отдельности, необходимо было установить закономерность распределения температуры в поверхностном слое обрабатываемой детали, а также определить усилия резания, действующие на обрабатываемую поверхность.

Температурные остаточные напряжения определялись алгебраическим сложением напряжений, возникающих в поверхностном слое при нагревании и охлаждении, причем они могут появиться только в том случае, если напряжения при нагревании превышают предел текучести. Напряжения же, образующиеся при охлаждении, могут быть как упругие, так и упругопластичные. При определении напряжений использован метод расчленения тела. Для примера представлены формулы для определения температурных остаточных напряжений при обработке лезвийным инструментом плоских поверхностей без учета упрочнения обрабатываемого материала

$$\sigma_{\text{ост.т}} = -\sigma_{\text{т}} + \frac{\beta_{\text{д}} A_1 E_{\text{д}}}{1-\mu} \left\{ \left(\frac{H-y+a_1}{a_1} \right)^{x_2} - \frac{a_1^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1+x_2) H} \right\} \text{ при } y \geq y_{\text{он}}; \sigma_{0\text{max}} < 2\sigma_{\text{т}}; \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{ост.т}} = \frac{\beta_{\text{д}} A_1 E_{\text{д}}}{1-\mu} \left\{ \frac{E_{\text{д}}}{a_1^{x_2} (1+x_2)} \left[(H+a_1-y)^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2} \right] + (1-\mu) \sigma_{\text{т}} (H-y_{\text{он}}) \right. \\ \left. + \frac{a_1^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1+x_2) H} \right\} \text{ при } y < y_{\text{он}}; \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_{\text{т}} \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{ост.т}} = \sigma_{\text{т}} \text{ при } y > y_{\text{оо}}; \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_{\text{т}} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{ост.т}} = -\sigma_{\text{т}} + \frac{\beta_{\text{д}} A_1 E_{\text{д}}}{1-\mu} \left\{ \left(\frac{H-y+a_1}{a_1} \right)^{x_2} + \right. \\ \left. + \frac{E_{\text{д}}}{a_1^{x_2} (1+x_2)} \left[(H+a_1-y_{\text{оо}})^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2} \right] + 2(1-\mu) \sigma_{\text{т}} (H-y_{\text{оо}}) \right\} \text{ при } \begin{cases} y_{\text{оо}} > y \geq y_{\text{он}}; \\ \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_{\text{т}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{ост.т}} = \frac{\beta_d A_1 E_d}{1 - \mu} \left\{ \frac{E_d}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H + a_1 - y_{00})^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right] + 2(1 - \mu) \sigma_T (H - y_{00}) \right. \\ \left. - \frac{E_d}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H - a_1 - y_{\text{он}})^{1+x_2} - (H - a_1)^{1+x_2} \right] + \sigma_T (1 - \mu) (H - y_{\text{он}}) \right\} \text{ при } \begin{cases} y < y_{\text{он}}; \\ \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_T \end{cases} \quad (5)$$

где H – толщина диска; $\sigma_{0\text{max}}$ – напряжения на поверхности при охлаждении; y – глубина залегания рассматриваемого слоя от поверхности; $y_{\text{он}}$, y_{00} – границы раздела упругих и пластических деформаций при нагревании и пластических деформаций при нагревании и охлаждении; σ_T и E_d – предел текучести и модуль упругости обрабатываемого материала; β_d и μ – коэффициент температурного линейного расширения и коэффициент Пуассона обрабатываемого материала; A_1 и x_2 – величины, определяющие значение температуры в поверхностном слое обрабатываемой детали; a_1 – толщина среза.

Остаточные напряжения, обусловленные силовым воздействием на поверхностный слой, определялись в соответствии с теоремой Генки о разгрузке как разность напряжений, возникающих при нагружении $\sigma_{\text{фикт}}$ и разгрузке $\sigma_{\text{ист}}$. Фиктивные напряжения определялись по формулам

$$\sigma_x = -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_1 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_2 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1}; \gamma \right] \right\} \frac{1}{1 - \mu^2}, \\ \sigma_y = -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_2 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_2 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1}; \gamma \right] \right\} \frac{1}{1 - \mu^2}, \\ \tau_{xy} = \frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_3 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_3 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1}; \gamma \right] \right\} \frac{1}{1 - \mu^2}, \quad (6)$$

где τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу; b_1 – ширина среза; b – периметр рабочих частей режущих кромок; Δ – длина площадки контакта задней поверхности резца с обрабатываемой поверхностью; Δ_1 – проекция поверхности сдвига на горизонтальную плоскость; h – глубина залегания опережающих пластических деформаций в поверхностном слое; B – критерий, характеризующий угол схода стружки; α и γ – задний и передний углы режущего инструмента.

Истинные напряжения определяются также по формулам (6) при условии, что y соответствует глубине залегания пластических деформаций. Условие пластичности определялось по теории Хубера-Мизеса.

При анализе шероховатости обработанной поверхности исходили из того, что в общем случае на формирование неровностей обработанной поверхности оказывают влияние не только геометрия сечения среза и инструмента, но и объем, и скорость пластического деформирования металла, обусловленные комплексом температурно-силовых явлений, возникающих в зоне резания. С учетом этого

$$R_z = \left\{ \frac{a_1^{0,125} b_1^{0,7} c_p \theta \rho_1^{0,1} a^{0,43} \left[2,85 \sin^{0,115} \alpha V^{0,57} a_1^{0,345} \lambda b^{0,3} + 0,6625 \lambda_p \beta \varepsilon a^{0,57} \rho_1^{0,075} \right]}{V \lambda \sin^{0,165} \alpha} \times \right. \\ \left. - 0,5 \tau_p \rho_1 b \left[\arccos \left(1 - a_2 B^{-b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x_2}} \right) + \frac{a_2 B^{1-b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x_2}}}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho_1} \right] \cos \alpha \right\} \frac{1}{8r}, \quad (7)$$

$$\times \frac{1}{\tau_p \left[1 + \frac{1}{B} + \operatorname{tg}(\operatorname{arctg} B - \gamma) \right]}$$

где c_p - удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала; θ - температура в зоне резания; ρ_1 - радиус округления режущей кромки резца; t - глубина резания; δ - длина площадки износа по задней поверхности резца; a - коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала; V - скорость резания; λ и λ_p - коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов; β и ε - угол заострения и угол при вершине резца в плане; r - радиус при вершине резца в плане; a_2, b_2, x_2 - величины, зависящие от условий обработки (угла схода стружки).

Глубина наклепа обработанной поверхности h_c принималась равной глубине залегания пластических деформаций. При этом исходили из условия, что возникновение пластических деформаций в поверхностном слое обусловлено одновременным воздействием силового и температурного факторов. В этом случае глубина залегания пластических деформаций определяется из условия равенства пределу текучести алгебраической суммы напряжений в поверхностном слое, обусловленным силовым и температурным воздействием, а именно

$$\sigma_y + \sigma_n = -\sigma_\tau, \quad (8)$$

$$\text{где } \sigma_{\text{ост.т}} = \frac{\beta_d A_1 E_d}{1 - \mu} \left\{ \left(\frac{H - y + a_1}{a_1} \right)^{x_2} + \frac{a_1^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2}}{(1 + x_2) a_1^{x_2} H} \right\}. \quad (9)$$

$$\sigma_\tau = -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \frac{1 + B + B \operatorname{tg}(\operatorname{arctg} B - \gamma)}{\left[B \cos \left(\frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{arctg} B \right) + \sin \left(\frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{arctg} B \right) \right] \cos \left(\frac{\pi}{2} 2 \operatorname{arctg} B \right)} \times \right. \\ \times \left[2 \arccos \frac{B + B \frac{y}{a_1}}{\sqrt{1 + \left(B + B \frac{y}{a_1} \right)^2}} - \sin \left(\frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{arctg} B \right) + \right. \\ \left. \left. + \frac{2 \left(B + B \frac{y}{a_1} \right) \left[2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{arctg} B \right) - 1 \right] + \sin 2 \left(\frac{\pi}{2} - 2 \operatorname{arctg} B \right) \left[\left(B + B \frac{y}{a_1} \right) \right]}{1 + \left(B + B \frac{y}{a_1} \right)^2} \right] \right\}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{\tau_p b}{2\pi b_1 \cos \alpha} \left[\frac{2}{\sin 2\left(\frac{\pi}{2} - 2\arctg B + \gamma\right)} \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta/\Delta_1 B}{y/a_1}\right)^2}} + 1 - \right. \\
& \left. \frac{\pi}{2} \frac{2 - \frac{\pi}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta/\Delta_1 B}{y/a_1}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta/\Delta_1 B}{y/a_1}\right)^2}} + \frac{2}{\operatorname{tg} 2\left(\frac{\pi}{2} - 2\arctg B + \gamma\right)} \frac{\frac{\pi}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta/\Delta_1 B}{y/a_1}\right)^2}}{1 + \left(\frac{\Delta/\Delta_1 B}{y/a_1}\right)^2} \right]. \quad (10)
\end{aligned}$$

Таким образом, глубина наклепанного слоя функционально определяется

$$h_c = f(\sigma_T, E_d, \tau_p, \mu, \beta_d, \lambda, \lambda_p, \sigma_p, V, s, t, r, \alpha, \gamma, \varphi, \varphi_1, \rho_1), \quad (11)$$

где φ и φ_1 - главный и вспомогательный углы в плане.

Установлено, что при обработке конструкционных и жаропрочных сталей и сплавов степень наклепа с достаточной для практических целей точностью может определяться по формуле

$$N = \frac{h_c}{1,25 \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{BЭ}}\right)^{0,8}}, \% \quad (12)$$

где σ_B - предел прочности обрабатываемого материала; $\sigma_{BЭ}$ - предел прочности электро-технической стали.

Результаты исследований позволяют решать задачи по определению параметров поверхностного слоя обрабатываемой детали, а также назначать технологические условия обработки, обеспечивающие заданные техническими условиями параметры поверхностного слоя.

С более полным освещением вопросов по изложенной проблеме можно ознакомиться в работе [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безъязычный В.Ф., Кожина Т.Д., Константинов А.В. и др. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей. -М.:Изд-во МАИ, 1993.-184с.