

УДК 621.9.048.6:539.3

В.И. Бутенко, д-р техн. наук, проф., Д.С. Дуров, канд. техн. наук, доц.,

Р.Г. Шаповалов, канд. техн. наук, доц.

Южный Федеральный университет, Россия

Тел/Факс: +7(8634) 371-622; E-mail: mkk@egf.tsure.ru

НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИАЛА ПРИ ФРИКЦИОННО-СИЛОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ИНДЕНТОРА С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЕТАЛИ

В статье рассмотрено напряжённо-деформированное состояние материала при фрикционно-силовом взаимодействии индентора инструмента с поверхностью детали в процессе отделочно-упрочняющей обработки. Полученные зависимости определили условия осуществления наноструктурирования материала поверхностного слоя деталей, выбор конструкции упрочняющего инструмента и его геометрию.

Ключевые слова: индентор, деталь, деформация, материал, функция, ползучесть, напряжение, релаксация.

1. Введение.

Важнейшей проблемой современного машиностроительного производства является получение деталей с высокими эксплуатационными свойствами. Достичь этого можно путём направленного наноструктурирования материала поверхностного слоя детали в процессе её финишной обработки [1, 2]. Анализ имеющихся литературных данных свидетельствует о том, что наиболее перспективным способом наноструктурирования материала поверхностного слоя детали является отделочно-упрочняющая обработка (ОУО), выполняемая с использованием твёрдосплавных и алмазных инструментов (инденторов). Характерной особенностью наноструктурирующей ОУО поверхностей деталей машин является направленная деформируемость материала поверхностном слое и сильное влияние времени деформирования на его поведение. Эти особенности в поведении обрабатываемого материала были приняты определяющими при математической формулировке и решении задачи о напряженно-деформированном состоянии материала поверхностного слоя деталей при наноструктурирующей ОУО и формировании градиентных слоёв, которые вследствие изменения параметров структуры, плотности дефектов, сдвиговых явлений и других факторов позволяют существенным образом повлиять на эксплуатационные характеристики детали [3].

2. Основное содержание и результаты работы

Пусть ε_{ij} – тензор малых деформаций, отнесённый к декартовой ортогональной системе координат x_i , а σ_{ij} – соответствующий тензор напряжений. Тогда анализ напряжённо-деформированного состояния материала при фрикционно-силовом взаимодействии индентора инструмента с обрабатываемой поверхностью детали при ОУО сводится к рассмотрению соотношения [4]

$$\sigma_{ij} = F_{ij}[\varepsilon_{ij}(\tau), \Theta(\tau)]_{t_0}^t, \quad t_0 \leq \tau \leq t, \quad (1)$$

где F_{ij} – функционалы по времени τ от деформаций и температуры Θ ; t_0 , t – начальное и конечное время анализа напряжённо-деформированного состояния обрабатываемого материала.

Естественно, что в некоторой области исходного ненапряжённого и недеформируемого материала поверхностного слоя обрабатываемой детали имеет место линейность механических свойств, при котором функционалы F_{ij} удовлетворяют следующим условиям:

$$\begin{aligned} F_{ij}[\varepsilon_{kl}^1(\tau) + \varepsilon_{kl}^2(\tau)] &= F_{ij}[\varepsilon_{kl}^1(\tau)] + F_{ij}[\varepsilon_{kl}^2(\tau)]; \\ F_{ij}[a\varepsilon_{kl}(\tau)] &= aF_{ij}[\varepsilon_{kl}(\tau)], \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varepsilon_{kl}^1, \varepsilon_{kl}^2$ – некоторые текущие значения тензора деформаций ε_{ij} ; a – некоторый числовой коэффициент.

Принимая процессы структурообразования при ОУО изотермическими, соотношения (1) и (2) можно представить в следующем виде:

$$S_{ij} = \int_0^t R(t, \tau) de_{ij}(\tau); \quad \sigma = \int_0^t R_1(t, \tau) d\bar{v}(\tau), \quad (3)$$

где S_{ij}, e_{ij} – девиаторы тензоров напряжений и деформаций; σ – среднее нормальное напряжение в материале поверхностного слоя; \bar{v} – относительное изменение объёма материала в наноструктурированном слое;

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij}; \quad e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\bar{v}\delta_{ij}; \quad \sigma = \frac{1}{3}\sigma_{kk}; \quad \bar{v} = \varepsilon_{kk}; \quad (4)$$

R, R_1 – универсальные для данного материала детали функции, определяемые фрикционно-силовым и тепловым воздействиями в зоне контакта индентора с обрабатываемой поверхностью.

Свойства материалов, описываемые соотношениями (3), неинварианты относительно изменения начала отсчёта времени, вследствие чего функции $R(t), R_1(t)$ называются функциями сдвиговой и объёмной релаксации. Поэтому напряжения σ и S_{ij} , определяющие напряжённо-деформированное состояние материала приповерхностного слоя детали и обуславливающее его наноструктурирование, выражают через деформации ε_{ij} , используя интегралы Стильтьеса, которые впервые предложил Больцман в следующем виде:

$$\sigma = \int_0^t R_1(t - \tau) d\bar{v}(\tau); \quad S_{ij} = \int_0^t R(t - \tau) de_{ij}(\tau), \quad (5)$$

или

$$\bar{v} = \int_0^t \Pi_1(t - \tau) d\sigma(\tau); \quad e_{ij} = \int_0^t \Pi_{ij}(t - \tau) dS_{ij}(\tau); \quad (6)$$

здесь $\Pi(t), \Pi_1(t)$ – функции сдвиговой и объёмной ползучести обрабатываемого материала соответственно.

Если функции $e_{ij}(\tau)$ и $\bar{v}(\tau)$ имеют при $0 \leq \tau \leq t$ интегрируемые (в обычном смысле, по Риману) производные $de_{ij}/d\tau, d\bar{v}/d\tau$, то соотношения (5) примут следующий вид:

$$\sigma = \int_0^t R_1(t - \tau) \frac{d\bar{v}}{d\tau} d\tau; \quad S_{ij} = \int_0^t R(t - \tau) \frac{de_{ij}}{d\tau} d\tau. \quad (7)$$

При аналогичных условиях соотношения (6) можно переписать в виде зависимостей

$$\bar{v} = \int_0^t \Pi_1(t - \tau) \frac{d\sigma}{d\tau} d\tau; \quad e_{ij} = \int_0^t \Pi(t - \tau) \frac{dS_{ij}}{d\tau} d\tau. \quad (8)$$

Если провести интегрирование по частям выражения для определения S_{ij} (7), то получится

$$S_{ij} = R(0)e_{ij}(t) + \int_0^t R'(t-\tau)e_{ij}(\tau)d\tau, \quad (9)$$

где $R'(t) = \frac{dR}{dt}$.

Считая, что при малых значениях времени t соотношение (9) асимптотически переходит в закон Гука, можно принять $R(0)=2G$, где G – модуль сдвига материала поверхностного слоя детали. Тогда, введя обозначение $\Gamma(t) = -\frac{dR(t)}{dt}$, из соотношения (9) получается:

$$S_{ij} = 2Ge_{ij}(t) - \int_0^t \Gamma(t-\tau)e_{ij}(\tau)d\tau. \quad (10)$$

Аналогично из формулы (7), представляющей собой выражение для определения напряжения σ , можно получить

$$\sigma = K_0\theta - \int_0^t \Gamma_1(t-\tau)\theta(\tau)d\tau, \quad (11)$$

$$\text{где } K_0 = R_1(0), \quad \Gamma_1(t) = -\frac{dR_1(t)}{dt};$$

здесь K_0 – модуль объёмного сжатия материала поверхностного слоя при ОУО детали.

Соотношения (8) для определения \bar{v} и e_{ij} также можно привести к виду, удобному для аналитического изучения напряжённо-деформированного состояния материала в приповерхностном слое детали, подвергнутой ОУО:

$$\bar{v} = \frac{1}{K_0}\sigma(t) + \int_0^t K_1(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau; \quad e_{ij} = \frac{1}{2G}S_{ij}(t) + \int_0^t K(t-\tau)S_{ij}(\tau)d\tau, \quad (12)$$

где $K(t) = \frac{d\Pi(t)}{dt}$; $K_1(t) = \frac{d\Pi_1(t)}{dt}$; $\Pi(0) = \frac{1}{2G}$; $\Pi_1(0) = \frac{1}{K_0}$ при условии, что $R(0) \cdot \Pi(0) = 1$ и $R_1(0) \cdot \Pi_1(0) = 1$.

Функции $\Gamma(t)$ и $\Gamma_1(t)$, входящие в соотношения (10) и (11), обычно называют ядрами соответственно сдвиговой и объёмной релаксации материала, а функции $K(t)$ и $R_1(t)$, входящие в соотношения (12), – ядрами сдвиговой и объёмной ползучести. Следует отметить, что соотношения типа (12), в которых деформации выражаются через напряжения в виде интегралов Римана, впервые предложил Вольтера.

Анализ полученных выражений (10) – (12) свидетельствует о том, что из четырёх ядер K , Γ , K_1 , Γ_1 лишь два являются независимыми. Действительно, если, например, в соотношении (10) считать заданными функции $S_{ij}(t)$, то соотношение (10) можно рассматривать как интегральное уравнение относительно девиатора деформаций e_{ij} . Решение этого уравнения имеет вид второго соотношения (12). Поэтому подстановка выражения (10) для определения S_{ij} во второе соотношение (12) должна давать тождество при любых функциях $e_{ij}(t)$. Исходя из этого, можно получить следующее соотношение, связывающее ядра сдвиговой ползучести $K(t)$ и релаксации $\Gamma(t)$:

$$\frac{1}{2G}\Gamma(t) + \int_0^t \Gamma(t-\tau)K(\tau)d\tau = 2GK(t). \quad (13)$$

Аналогічно можна знайти співвідношення, що зв'язує ядра об'ємної ползучості $K_1(t)$ і релаксації $\Gamma_1(t)$:

$$\frac{1}{K_0} \Gamma_1(t) + \int_0^t \Gamma_1(t-\tau) K_1(\tau) d\tau = K_0 K_1(t). \quad (14)$$

Учитывая обозначения (4), из соотношений (13) и (14) можно получить следующую формулу определения текущего напряжения σ_{ij} в материале поверхностного слоя детали, подвергнутой ОУО, через деформацию ε_{ij} :

$$\sigma_{ij} = \left(K_0 - \frac{2}{3} G \right) \bar{v} + 2GS_{ij} - \delta_{ij} \int_0^t \left[\Gamma_1(t-\tau) - \frac{1}{3} \Gamma(t-\tau) \right] \bar{v}(\tau) d\tau - \int_0^t \Gamma(t-\tau) \varepsilon_{ij}(\tau) d\tau. \quad (15)$$

Обратные выражения деформации ε_{ij} через напряжения σ_{ij} будут иметь следующий вид:

$$S_{ij} = \left(\frac{1}{3K_0} - \frac{1}{2G} \right) \sigma \delta_{ij} + \frac{1}{2G} \sigma_{ij} + \delta_{ij} \int_0^t \left[\frac{1}{3} K_1(t-\tau) - K(t-\tau) \right] \sigma(\tau) d\tau + \int_0^t K(t-\tau) \sigma_{ij}(\tau) d\tau. \quad (16)$$

Если в качестве исходных данных принять условия (5) и (6), то напряжения σ_{ij} через деформации ε_{ij} могут быть представлены следующим соотношением:

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} \int_0^t \left[R_1(t-\tau) - \frac{1}{3} R(t-\tau) \right] d\bar{v}(\tau) + \int_0^t R(t-\tau) d\varepsilon_{ij}(\tau), \quad (17)$$

которое, будучи разрешённым относительно деформаций ε_{ij} , имеет вид

$$\varepsilon_{ij} = \delta_{ij} \int_0^t \left[\frac{1}{3} \Pi_1(t-\tau) - \Pi(t-\tau) \right] d\bar{v}(\tau) + \int_0^t \Pi(t-\tau) d\sigma_{ij}(\tau). \quad (18)$$

Функции $\Pi(t)$, $\Pi_1(t)$, $R(t)$, $R_1(t)$, входящие в соотношения (16) – (18), не зависят от вида напряжённого состояния материала поверхностного слоя детали, подвергнутой ОУО, и потому могут быть определены по результатам дополнительных экспериментальных исследований. Так, например, функция сдвиговой ползучести $\Pi(t)$ может быть определена из результатов исследования материала на ползучесть при чистом сдвиге (например, при кручении тонкостенной трубки). В этом случае единственная отличная от нуля компонента σ_{12} тензора напряжений имеет вид

$$\sigma_{12}(t) = \sigma_{12}^0 h(t), \quad (19)$$

где $h(t)$ – единичная функция Хевисайда:

$$h(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0; \\ 1, & t > 0. \end{cases} \quad (20)$$

Подставляя (19) в соотношение (18), можно найти отличную от нуля компоненту тензора деформаций ε_{12} в виде следующей зависимости:

$$\varepsilon_{12} = \sigma_{12}^0 \int_0^t \Pi(t-\tau) \delta(\tau) d\tau = \sigma_{12}^0 \Pi(t), \quad t \geq 0. \quad (21)$$

В полученной зависимости $\delta(\tau)$ – дельта функция Дирака: $\delta(\tau) = h'(\tau)$. При вычислении интеграла в зависимости (21) используется следующее свойство дельта-функции:

$$\int_0^t f(t, \tau) \delta(\tau) d\tau = f(t, 0), \quad t \geq 0. \quad (22)$$

В рассматриваемом случае при проведении дополнительных экспериментальных исследований обычно измеряется деформация ползучести, как функция времени, т.е. $\varepsilon_{12} = f_{12}(t)$. Тогда, учитывая зависимость (21), для функции сдвиговой ползучести $\Pi(t)$ можно записать

$$\Pi(t) = \frac{1}{\sigma_0} f_{12}(t). \quad (23)$$

Функция объёмной ползучести $\Pi_1(t)$ может быть определена из эксперимента на ползучесть при всестороннем равномерном сжатии исследуемого материала (образца). В этом случае имеют место следующие соотношения:

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_0 h(t); \quad \sigma_{ij} = 0 \text{ при } i \neq j; \quad \sigma = \sigma_0 h(t). \quad (24)$$

Тогда из соотношения (17) для $\bar{v} = \varepsilon_{kk}$ получается

$$\bar{v} = \int_0^t \Pi_1(t - \tau) d\sigma(\tau). \quad (25)$$

Подставляя значение напряжения σ из соотношений (24) в зависимость (25), получается

$$\bar{v} = \sigma_0 \Pi_1(t), \quad t \geq 0. \quad (26)$$

Так как в эксперименте определяется относительное изменение единичного объёма материала поверхностного слоя детали, подвергнутой ОУО, $\bar{v} = f(t)$, то можно написать

$$\Pi_1(t) = \frac{1}{\sigma_0} f(t). \quad (27)$$

Следует отметить, что обе функции $\Pi(t)$ и $\Pi_1(t)$ могут быть определены по результатам одного и того же эксперимента – простого растяжения образца, если, однако, при этом будут определены продольная ε_{11} и поперечная деформации образца ε_{22} . Действительно, при проведении эксперимента на определение ползучести материала обрабатываемой детали при простом растяжении, вызванном фрикционно-силовым взаимодействием индентора с поверхностным слоем, имеет место равенство [5] $\sigma_{11} = \sigma_1^0 h(t)$, а остальные компоненты напряжения σ_{ij} равны нулю. Если при растяжении образца из материала исследуемой детали определены продольная ε_{11} и поперечная $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ деформации, как функции времени $\varepsilon_{11} = f_1(t)$ и $\varepsilon_{22} = f_2(t)$, то справедливы следующие соотношения:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{3} \sigma_0 \left[\frac{1}{3} \Pi_1(t) + 2\Pi(t) \right]; \quad \varepsilon_{22} = \frac{1}{3} \sigma_0 \left[\frac{1}{3} \Pi_1(t) - \Pi(t) \right]. \quad (28)$$

Используя соотношения (28) и предыдущие рассуждения о значениях продольной и поперечной деформаций, можно получить функциональные зависимости для определения $\Pi(t)$ и $\Pi_1(t)$ следующего вида:

$$\Pi(t) = \frac{1}{\sigma_0} [f_1(t) - f_2(t)]; \quad \Pi_1(t) = \frac{3}{\sigma_0} [f_1(t) + 2f_2(t)]. \quad (29)$$

Проведением аналогичных экспериментов на релаксацию материала детали могут быть определены функции сдвиговой $R(t)$ и объёмной $R_1(t)$ релаксации материала

поверхностного слоя детали после ОУО. Например, при проведении эксперимента на определение релаксации при чистом сдвиге имеет место соотношение $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{12}^0 h(t)$, а остальные деформации $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}$ равны нулю. При этом в эксперименте одновременно определяется сдвиговое напряжение в виде функции $\sigma_{12} = \psi_{12}(t)$. Тогда, учитывая ранее полученное соотношение (17), по аналогии с зависимостью (23) можно найти функцию сдвиговой релаксации материала поверхностного слоя детали после ОУО $R(t)$ в виде следующей зависимости:

$$R(t) = \frac{1}{\varepsilon_{12}^0} \psi_{12}(t). \quad (30)$$

Если функции ползучести Π, Π_1 и релаксации R, R_1 определены, ядра ползучести K, K_1 и релаксации Γ, Γ_1 , входящие в формулы (15), (16), найдутся дифференцированием соответствующих функций (11), (12) с учётом их преобразований. При этом следует отметить, что, если, например, ядра ползучести K, K_1 определены по результатам эксперимента, то соответствующие ядра релаксации Γ, Γ_1 могут быть получены теоретически, как решения интегральных уравнений (13), (14). Если же ядра Γ, Γ_1 определены независимо от результатов проводимых экспериментов, то соотношения (13), (15) могут служить основанием для проверки удовлетворительности описания деформации материала поверхностного слоя детали при ОУО зависимостями (17) и (18).

3. Общий алгоритм и рекомендации

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм анализа напряжённо-деформированного состояния материала при фрикционно-силовом взаимодействии индентора с обрабатываемой поверхностью детали в процессе наноструктурирующей ОУО. В основе его лежит выполнение следующих этапов.

1. Описание свойств обрабатываемого материала универсальными функциями R и R_1 , определяемыми фрикционно-силовым и тепловым воздействием в зоне контакта индентора с обрабатываемой поверхностью.

2. Формирование функций сдвиговой $\Pi(t)$ и объёмной $\Pi_1(t)$ ползучести обрабатываемого материала детали.

3. Установление функциональной связи между относительным изменением объёма материала в наноструктурированном слое \bar{v} и его деформацией e_{ij} .

4. Получение формулы определения текущего напряжения σ_{ij} в материале поверхностного слоя детали, подвергаемой ОУО, через ядра объёмной ползучести $\Pi_1(t)$ и релаксации $\Gamma_1(t)$.

5. Анализ зависимостей, определяющих компоненты напряжений σ_{ij} и деформаций $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$, сравнение их с экспериментальными данными.

4. Цифровые модели

В работе представлены математические структурно-логические модели анализа напряжённо-деформированного состояния материала при фрикционно-силовом взаимодействии индентора с обрабатываемой поверхностью детали, включая вывод формулы функции сдвиговой ползучести $\Pi(t)$ и её использование при нахождении функции сдвиговой релаксации материала поверхностного слоя детали после наноструктурирующей ОУО $R(t)$. При этом показано, что ядра ползучести K и K_1 могут быть определены по результатам экспериментальных исследований, а соответствующие ядра релаксации Γ и Γ_1 могут быть получены теоретически, как решения интегральных уравнений (13), (14).

лаксации Г и Г1 получают теоретически, как результат решения интегральных уравнений (13) и (14) с последующим их преобразованием.

5. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее.

1. Выполнен анализ напряжённо-деформированного состояния материала при фрикционно-силовом взаимодействии индентора с обрабатываемой поверхностью детали в процессе наноструктурирующей ОУО.

2. Получены аналитические зависимости, определяющие условия осуществления наноструктурирующей ОУО, выбор упрочняющего инструмента и его геометрии.

3. Разработаны рекомендации по прогнозированию сдвиговой деформации и релаксации материала поверхностного слоя, позволяющие обоснованно назначать параметры управления пластическим наноструктурированием материала поверхностного слоя при ОУО высокоресурсных и прецизионных деталей машин.

Список литературы:

1. Бутенко В.И., Дуров Д.С., Шаповалов Р.Г. Научно-технические технологии создания высокоресурсных деталей машин. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – 404 с.

2. Бутенко В.И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 267 с.

3. Курзина И.А., Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П. Градиентные поверхностные слои на основе интерметаллидных частиц: синтез, структура, свойства. – Томск: Изд-во НТЛ, 2013. – 360 с. ISBN 978-5-89503-529-0.

4. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с. ISBN 978-5-94275-600-0.

5. Тамаркин М.А., Тищенко А.А. Технологические основы обработки деталей ППД в гранулированных рабочих средах / Научно-технические технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: Материалы 4-ой Междунар. науч.-техн. конф. Часть II. – Рыбинск: Изд-во РГАТУ, 2012. – С. 217 – 212. ISBN 978-5-88435-446-3.

Надійшла до редколегії 24.12.2014.

V.I. Butenko, D.S. Durov, R.G. Shapovalov

THE PRESSED-DEFORMED CONDITION OF A MATERIAL AT FRICTION-FORCE INTERACTION OF INDENTER WITH A PROCESSABLE SURFACE OF A DETAIL

In clause the pressed-deformed condition of a material is considered at friction-force interaction of the tool's indenter with a surface of a detail in process of finishing-hardening processing. The received dependences have determined conditions of realization of a material's nanostructuring of a superficial layer of details, choice of a design of the hardening tool and its geometry.

Key words: indenter, detail, deformation, material, function, creep, pressure, relaxation.

В.І. Бутенко, Д.С. Дуров, Р.Г. Шаповалов

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН МАТЕРІАЛУ ПРИ ФРИКЦІЙНО-СИЛОВІЙ ВЗАЄМОДІЇ ІНДЕНТОРА З ОБРОБЛЮВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ДЕТАЛІ

У статті розглянутий напружено-деформований стан матеріалу при фрикційно-силовій взаємодії індентора інструменту з поверхнею деталі в процесі обробно-зміцнюючої обробки. Отримані залежності визначили умови здійснення наноструктуризації матеріалу поверхневого шару деталей, вибір конструкції зміцнюючого інструменту і його геометрію.

Ключові слова: індентор, деталь, деформація, матеріал, функція, повзучість, напруження, релаксація.