

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 ВЗАЙМОДЕЙСТВИИ 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 влиять на эксплуатационные характеристики детали [3].

### 2. Основное содержание и результаты работы

Пусть  $\varepsilon_{ij}$  – тензор малых деформаций, отнесённый к декартовой ортогональной системе координат  $x_i$ , а  $\sigma_{ij}$  – 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]

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

где  $F_{ij}$  – функционалы по времени  $\tau$  от деформаций и температуры  $\Theta$ ;  $t_0$ ,  $t$  – 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  $\varepsilon_{ij}$ ;  $a$  – некоторый числовой коэффициент.

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

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

где  $S_{ij}$ ,  $e_{ij}$  – девиаторы тензоров напряжений и деформаций;  $\sigma$  – 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  $R(t)$ ,  $R_1(t)$  называют функциями сдвиговой и объёмной релаксации. Поэтому напряжения  $\sigma$  и  $S_{ij}$ , определяющие напряжённо-деформированное состояние материала приповерхностного слоя детали и обуславливающее его наноструктурирование, выражают через деформации  $e_{ij}$ , используя интегралы Стильтьеса, которые впервые предложил Больцман в следующем виде:

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

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  $\sigma$ , можно получить

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

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

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

$$R(0)\cdot\Pi(0) = 1 \text{ и } R_1(0)\cdot\Pi_1(0) = 1.$$

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  $K$ ,  $\Gamma$ ,  $K_1$ ,  $\Gamma_1$  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  $\Gamma(t)$ :

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

Аналогично можно найти соотношение, связывающее ядра об'ємной ползучести  $K_1(t)$  и релаксации  $\Gamma_1(t)$ :

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

Учитывая обозначения (4), из соотношений (13) и (14) можно получить следующую формулу определения текущего напряжения  $\sigma_{ij}$  в материале поверхностного слоя детали, подвергаемой ОУО, через деформацию  $\varepsilon_{ij}$ :

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

Обратные выражения деформации  $\varepsilon_{ij}$  через напряжения  $\sigma_{ij}$  будут иметь следующий вид:

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

Если в качестве исходных данных принять условия (5) и (6), то напряжения  $\sigma_{ij}$  через деформации  $\varepsilon_{ij}$  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  $\varepsilon_{ij}$ , 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 трубы). В этом случае единственная отличная от нуля компонента  $\sigma_{12}$  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  $\varepsilon_{12}$  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  $\sigma$  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  $\varepsilon_{11}$  и поперечная деформации образца  $\varepsilon_{22}$ . 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  $\sigma_{ij}$  равны нулю. Если при растяжении образца из материала исследуемой детали определены продольная  $\varepsilon_{11}$  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 сдвиговые 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 поверхности 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  $\Pi, \Pi_1$  и релаксации  $R, R_1$  определены, ядра ползучести  $K, K_1$  и релаксации  $\Gamma, \Gamma_1$ , 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  $\Gamma, \Gamma_1$  могут быть получены теоретически, как решения интегральных уравнений (13), (14). Если же ядра  $\Gamma, \Gamma_1$  определены независимо от результатов проводимых экспериментов, то соотношения (13), (15) могут служить основанием для проверки удовлетворительности описания деформации материала поверхности 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  $\sigma_{ij}$  в материале поверхности слоя детали, подвергаемой ОУО, через ядра объёмной ползучести  $\Pi_1(t)$  и релаксации  $\Gamma_1(t)$ .
5. Анализ зависимостей, определяющих компоненты напряжений  $\sigma_{ij}$  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 поверхности 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 ре-

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 напряженно-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. Наукоёмкие 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 / Наукоёмкие технологии в машиностроении и авиа двигателестроении: 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 C**

### 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 напруженено-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, напруга, релаксація.