

УДК 621.9.048.6

В.І. Бутенко, д-р техн. наук, проф.

Южный федеральный университет, Россия

Тел./Факс: +7 (8634)-310-598; E-mail: mkk@egf.tsu.re.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В статье рассмотрена возможность динамического конечно-элементного моделирования наноструктурирующей отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин с целью выявления особенностей фрикционно-силового нагружения материала поверхностного слоя. Анализ напряженно-деформированного состояния материала обрабатываемой детали и определение параметров управления пластическим структурообразованием осуществлялись с использованием программы, в которой моделируемый образец поверхностного слоя рассматривался в виде прямоугольника с заданными граничными условиями симметрии. Определено предельное число базовых циклов нагружений на накопление пластической деформации в материале поверхностного слоя при выборе рациональных режимов отделочно-упрочняющей обработки детали.

Ключевые слова: моделирование, поверхность, деталь, материал, нагружение, деформация, обработка, инструмент.

Введение

Для повышения работоспособности деталей машин в современном машиностроении широкое применение находят различные виды отделочно-упрочняющей обработки поверхностей. Однако в большинстве случаев выбор режимов отделочно-упрочняющей обработки деталей и инструментов для ее осуществления проводится без учета вероятного состояния материала поверхностного слоя, что существенно снижает эффективность такой обработки, а в некоторых случаях делает ее бесполезной. В связи с этим важнейшей задачей в совершенствовании процессов отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) поверхностей деталей машин является разработка методов определения параметров управления и критериев пластического структурообразования материала поверхностного слоя деталей из конструкционных сталей и сплавов при однократном и многократном фрикционно-силовом нагружении мезообъемов материала инструментом, что возможно путем проведения динамического конечно-элементного и физического моделирования. Такое моделирование позволяет установить функциональную взаимосвязь режимных параметров ОУО деталей с выходными параметрами пластического структурообразования поверхностного слоя, определяющим реализацию основных условий развития дислокационно-дисклинационного механизма фрагментации и формирования однородной структуры материала детали, а также обосновать выбор материала рабочих элементов индентора используемого инструмента.

Основное содержание и результаты работы

Для установления закономерностей управления пластическим структурообразованием материала поверхностного слоя детали при однократном фрикционно-силовом нагружении разработан метод динамического конечно-элементного моделирования процесса по установленной кривой деформационного упрочнения $\sigma_s = f(\varepsilon)$. При этом в

основу математической постановки задачи определения показателей напряженно-деформированного состояния материала поверхностного слоя обрабатываемой детали и параметров управления пластическим структурообразованием поверхностного слоя $Y_{\text{ст}}$ положен вариационный принцип виртуальных перемещений, согласно которому виртуальное изменение внутренней энергии деформаций должно компенсироваться таким же изменением внешней работы приложенных к телу нагрузок:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_S f_i^S \delta u_i dS + \int_V f_i^B \delta u_i dV, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора Коши; $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{du_i}{dx_j} + \frac{ddu_j}{dx_i} \right)$ - компоненты тензора деформаций; u_i - компоненты вектора перемещений; x_i – текущие координаты; f_i^S - компоненты вектора поверхностных сил; f_i^B - компоненты вектора массовых сил (в том числе трения и инерции); V – объем деформируемого тела; S – площадь поверхности рассматриваемого участка деформируемого тела.

Для реализации вариационного принципа виртуальных перемещений напряжения определялись через деформации, что позволило свести задачу к системе уравнений для приращений перемещений du_i . По ним на каждом шагу рассчитывалось приращение полных деформаций $d\varepsilon_{ij}$, которое раскладывалось на приращения упругих $d\varepsilon_{ij}^e$ и пластических деформаций $d\varepsilon_{ij}^{pl}$:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^{pl}. \quad (2)$$

Приращения пластических деформаций определялись из закона пластического течения материала [1]

$$d\varepsilon_{ij}^{pl} = d\lambda \frac{df(\sigma_{ij})}{d\sigma_{ij}} \quad (3)$$

с критерием текучести Мизеса

$$f(\sigma_{ij}) = \sigma_{eg} - \sigma_s(\varepsilon_{eg}^{pl}) = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} \sigma_{ij}} - \sigma_s(\varepsilon_{eg}^{pl}), \quad (4)$$

где $\sigma_{eg} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} \sigma_{ij}}$ - эквивалентное напряжение по Мизесу; $\sigma_s(\varepsilon_{eg}^{pl})$ - предел текучести, который зависит от накопленных пластических деформаций в соответствии с заданной кривой упрочнения; S_{ij} – девиатор тензора напряжений, определяемый по формуле

$$S_{ij} = \sigma_{ij} + P_s \delta_{ij}, \quad (5)$$

здесь P_s – давление; δ_{ij} – символ Кронекера.

Приращения упругих деформаций определялись как разность приращений полных и пластических деформаций, после чего на основании закона Гука вычисляются приращения напряжений:

$$d^J \sigma_{ij} = D_{ijkl} d\varepsilon_{kl}^e, \quad (6)$$

где $d^J \sigma_{ij} = d\sigma_{ij} - \sigma_{ik} d\omega_{jk} - \sigma_{jk} d\omega_{ik}$ - приращение напряжений в смысле Яуманна, учитывающее поворот тела как жесткого целого; D_{ijkl} - матрица упругих коэффициентов; $\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{du_i}{dx_j} - \frac{du_j}{dx_i} \right)$ - тензор поворота.

Анализ напряженно-деформированного состояния материала детали и определение параметров управления пластическим структурообразованием в базовом цикле нагружения поверхностного слоя был выполнен с использованием программы конечно-элементного анализа ANSYS/LS-DYNA. Моделирование было реализовано в рамках двухмерной постановки задачи и условий плоскодеформированного состояния материала поверхностного слоя детали. При этом рабочий элемент индентора моделировался абсолютно жестким телом полусферической формы. Для конечно-элементного моделирования деформируемых конструкционных сталей была принята модель упруго-пластического тела с изотропным упрочнением по экспериментально определенному закону и критерием текучести Мизеса. Моделируемый образец поверхностного слоя моделировался в виде прямоугольника с заданными граничными условиями симметрии. Схема нагружения моделируемого образца и фрагмент расчетной сетки представлены на рис. 1.

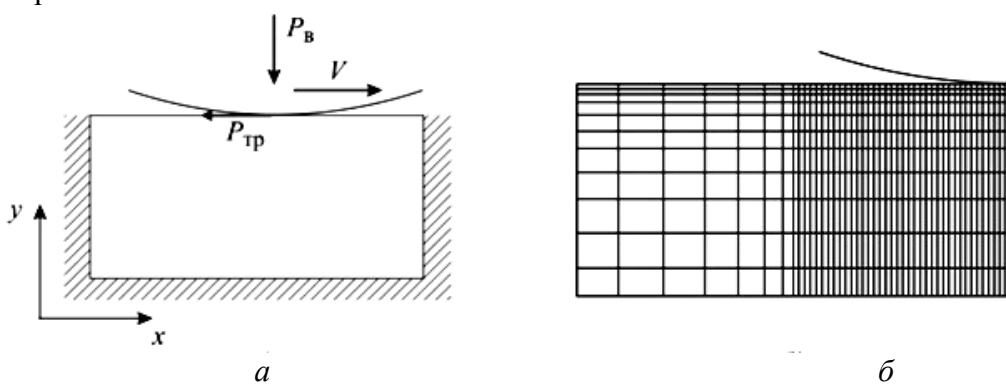


Рис. 1. Схема условий фрикционно-силового нагружения моделируемого образца (а) и фрагмента расчетной сетки вблизи точки контакта индентора с поверхностью (б)

Фрикционно-силовое и скоростное нагружение образца задавалось путем расчета взаимодействия верхней грани деформируемого образца с индентором и осуществлялось при движении индентора с постоянной скоростью обработки v_b и при сохранении нагрузки P_b и коэффициента трения f_t . В расчетах варьировались значения коэффициента трения f_t и силы выглаживания P_b . При этом в рамках одного расчета выбранные значения коэффициента деформационного трения f_t и силы выглаживания P_b принимались фиксированными. При моделировании также предполагалось, что задаваемая сила P_b обеспечивает глубину внедрения индентора, превышающую глубину впадин исходного микропрофиля Rv .

Для построения конечно-элементной сетки были выбраны четырехугольные симплексные (четырехузловые) элементы с линейной интерполяцией искомых величин (рис. 1, б). При их построении производилось сгущение сетки снизу вверх таким образом, чтобы у поверхности контакта размер элемента был минимален. Кроме того, в горизонтальном направлении сетка была разрежена на краях расчетной области, где не ожидалось резкого изменения напряженно-деформированного состояния материала. Количество узлов расчетной сетки достигало 53352, количество элементов – 51601.

При конечно-элементном моделировании использовалась кривая деформационного упрочнения $\sigma_s = f(\varepsilon)$, восстановленная по результатам кинетического индентирования согласно методике, изложенной в работе [2]. Испытания материала образцов на кинетическое вдавливание инденторов проводилось на твердомере ТЕСТ-МИНИ (УТ) конструкции ВНИИАЭС [3]. Аналитическое описание диаграммы деформационного упрочнения представлялось трехпараметрической степенной зависимостью вида

$$\sigma_s = \sigma_0 (1 + a_1 \varepsilon)^{a_2}, \quad (7)$$

где ε – степень пластической деформации материала поверхностного слоя; σ_0 , a_1 , a_2 – эмпирические коэффициенты; при этом коэффициент σ_0 имеет смысл напряжения, соответствующего пределу текучести.

Для получения кривой деформационного упрочнения исследовались образцы из термоупрочненной стали 20Х13, цементованной стали 20Х и термообработанной стали 08Х18Н10Т после предварительного чистового точения. Индентирование выполнялось тремя алмазными инденторами Виккерса с углами при вершинах 90, 123 и 136 градусов. Каждым индентором было проведено 10 вдавливаний с записью диаграмм вдавливания. Полученные значения предела текучести σ_0 , коэффициентов a_1 , a_2 в формуле аппроксимации (7) приведены в табл. 1. Анализ напряженно-деформированного состояния материала поверхностного слоя детали осуществлялся по эквивалентному напряжению Мизеса (интенсивности напряжений) σ_{eg} , зависящему от тензора напряжений в декартовой системе координат σ_{ij} и определяемому по формуле:

$$\sigma_{eg} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} \sigma_{ij}}. \quad (8)$$

Таблица 1. Параметры диаграмм деформационного упрочнения

$$\sigma_s = \sigma_0 (1 + a_1 \varepsilon)^{a_2}$$

Материал	Коэффициент c ?10-3 для пирамидальных инденторов Виккерса			Коэффициенты аппроксимации		
	90°	123°	136°	σ_0 , МПа	a_1	a_2
Сталь 20Х цементованная	51,2	114	209,5	1200	200	0,41
Сталь 20Х13	32,3	90,2	185,8	1400	144	0,32
Сталь 08Х18Н10Т	9,8	29,3	40,7	289	19,9	0,49

Особую важность для понимания процессов деформации поверхности детали при наноструктурирующей ОУО представляет исследование динамических смещений микрообъемов материала поверхностного слоя в направлении силы воздействия P_v и скорости обработки v_v . Исследование вертикальных u_y и горизонтальных u_x макромасштабных смещений материала поверхностного слоя осуществлялось для n равноотстоящих друг от друга точек на поверхности образца.

Интенсивность накопленных пластических деформаций ε , степень накопленной пластической деформации сдвига Λ и поврежденность ω определялись для центральной i -той точки, используя следующие зависимости:

$$\varepsilon_{eg}^{pl} = \int \sqrt{\frac{2}{3} \frac{d\varepsilon_{ij}^{pl}}{dt} \frac{d\sigma_{ij}^{pl}}{dt}}; \quad \Lambda = \int_{t_0}^{t_{bu}} H dt, \quad (9)$$

где $\frac{d\varepsilon_{ij}^{pl}}{dt}$ - компоненты тензора скоростей пластических деформаций; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; t_{bu} – время базового цикла фрикционно-силового нагружения материала поверхностного слоя детали. Накопленная повреждаемость может быть определена по рекуррентной формуле [4]:

$$\omega = \left(\omega_i^{1/a_{i-1}} + \frac{\Delta \Lambda_i}{\Lambda_{pi}} \right)^{a_i}, \quad (10)$$

где i – количество этапов нагружения; a – эмпирический коэффициент; Λ_{pi} – пластичность материала при напряженном состоянии, реализуемом на i -той ступени деформирования; $\Delta \Lambda_i$ – приращение степени деформации сдвига, накопленной на i -той ступени деформирования.

Апробация вышеизложенного методического подхода к конечно-элементному моделированию наноструктурирующего выглаживания была выполнена в программном пакете ANSYS/LS-DYNA применительно к термоупрочненной цементованной стали 20Х (HRC 50 – 55). Значение механических характеристик нагружаемого материала были приняты следующими: модуль Юнга $E = 218$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,267$, плотность $\rho = 7670$ кг/м³.

В динамической постановке задачи исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя моделировалось движение индентора с постоянной скоростью $v_b = 0,16$ м/с при изменении силы вдавливания (или выглаживания) P_b от 122,5 Н до 500 Н и коэффициента трения f_t в пределах 0,05 – 0,35. Анализ распределения напряжений при повышенной фрикционно-силовой нагрузке (сила вдавливания $P_b = 350$ Н, коэффициент трения $f_t = 0,35$) был выполнен по длине образца с учетом контактной и внеконтактной зон очага деформации, а также по глубине поверхностного слоя. На рис. 3 показаны положения индентора, деформированная сетка конечных элементов и распределение компонент тензора напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} , а также гидростатического давления P_s , эквивалентных напряжений σ_{eg} , показателя напряженного состояния K и коэффициента Лоде-Надаи β_σ . Напряжения σ_{xx} (рис. 2, а) перед индентором в передней полуконтактной зоне отрицательны, что свидетельствует о практических всестороннем сжатии материала поверхностного слоя обрабатываемой детали. В зоне контакта знак напряжений σ_{xx} постепенно меняется на противоположный, вследствие чего за индентором имеют место положительные растягивающие напряжения. Установлено, что при увеличении коэффициента трения f_t максимальное растягивающее напряжение σ_{xx} в области за индентором растет, что может вызвать формирование в материале поверхностного слоя детали поперечных трещин.

Анализ нормальных напряжений σ_{yy} (рис. 2, б) показывает, что практически во всей зоне контактного взаимодействия деформируемый материал поверхностного слоя детали испытывает напряжение сжатия, что является важнейшим условием фрагментирования и наноструктурирования материала поверхностного слоя при ОУО деталей [5].

На рис. 3 представлены графики компонент тензора напряжений σ_{xy} , эквивалентных напряжений σ_{eg} , гидростатического давления P_s , коэффициента Лоде-Надаи β_σ и показателя напряженного состояния K на глубине 15 мкм (а) и 45 мкм (б) от поверхности

при наноструктурирующем выглаживании стали 20Х с силой $P_{\text{в}} = 350$ Н и $f_{\text{т}} = 0,35$, из анализа которых видно, что характерной особенностью динамического напряженно-деформированного состояния материала поверхностного слоя при наноструктурирую-

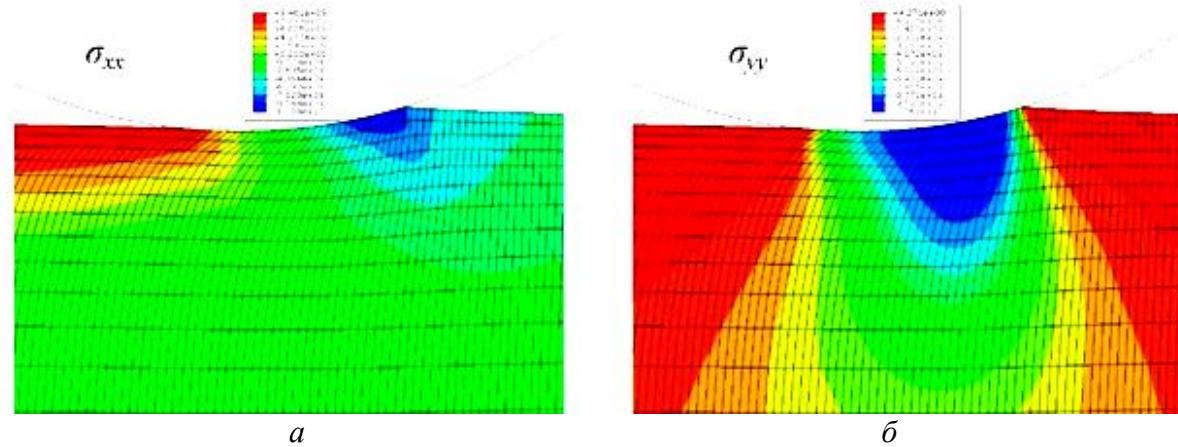


Рис. 2. Распределение компонент тензора напряжений σ_{xx} (а) и σ_{yy} (б) в поверхностном слое образца при динамическом фрикционно-силовом нагружении

щем выглаживании является образование перед индентором клиновидной области, в которой напряжения сдвига σ_{xy} имеют положительные значения. При этом область максимальных положительных напряжений сдвига σ_{xy} с увеличением коэффициента трения $f_{\text{т}}$ располагается непосредственно в приповерхностном слое. За индентором образуется область отрицательных напряжений сдвига σ_{xy} , в которой максимальные отрицательные напряжения смещены вглубь деформируемого материала.

Совместный анализ компонент напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} свидетельствует о том, что в приповерхностном слое (рис. 4, а) напряженное состояние материала перед индентором подобно осноносному сжатию. При предельных значениях силы вдавливания $P_{\text{в}} = 350$ Н и коэффициенте трения $f_{\text{т}} = 0,35$ коэффициент Лоде-Надаи в этой зоне равен $\gamma_{\sigma} \approx 0,5$, а напряженное состояние материала за индентором близко к соосному растяжению ($\gamma \approx -0,7$). Непосредственно в зоне контакта индентора с деформируемым материалом реализуется сложное напряженное состояние, необходимое для фрагментирования исходной структуры поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Общий алгоритм и рекомендации

Важнейшими методическими этапами динамического конечно-элементного моделирования наноструктурирующей ОУО поверхностей деталей в базовом цикле фрикционно-силового нагружения являются:

1. Выявление особенностей распределения компонент тензора напряжений и диссирированной энергии в контактной и внеконтактной зонах очага деформации при повышенной фрикционно-силовой нагрузке поверхностного слоя детали.
2. Установление закономерностей изменения и глубины залегания максимальных напряжений сдвига в очаге деформации во взаимосвязи с параметрами фрикционно-силового нагружения и физико-механическими свойствами поверхностного слоя.
3. Анализ динамических смещений точек поверхностного слоя u_x и u_y и установление зависимостей глубины внедрения индентора инструмента $h_{\text{вн}}$, высоты валика оттесненного металла $h_{\text{в}}$, масштабного коэффициента $K_{\text{в}}$ и кратности нагрузления $n_{\text{с}}$ от изменения параметров фрикционно-силового нагружения при стационарной наноструктурирующей ОУО поверхностей деталей.

4. Установление динамической взаимосвязи интенсивности накопленных деформаций сдвига ε_x с силой внешнего воздействия P_b и коэффициентом трения f_b во внеконтактной и контактной зонах очага деформации.

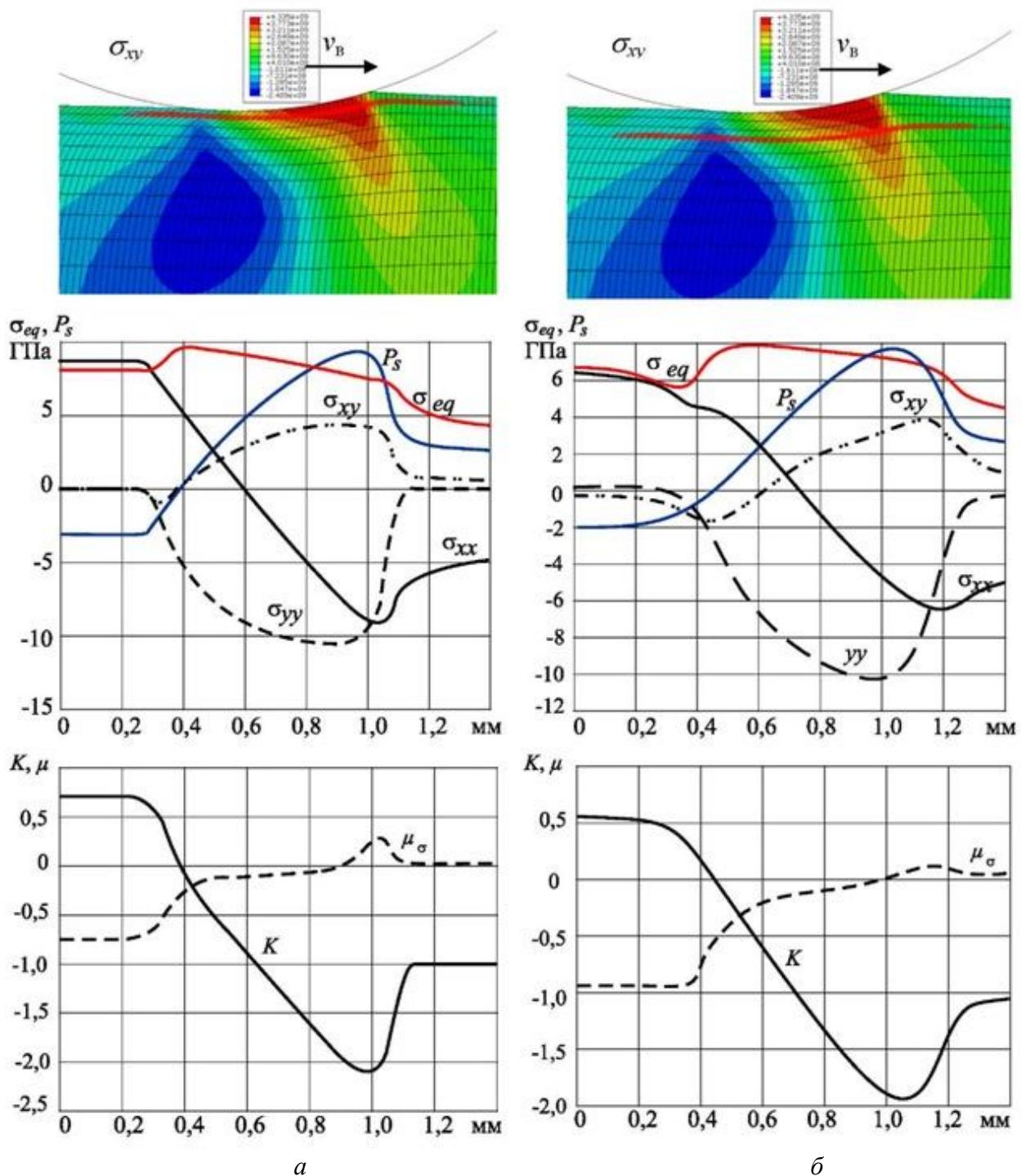


Рис. 3. Графики распределения напряжений σ_{xy} , σ_{eq} , давления P_s , коэффициента μ_σ и показателя K на глубине 15 мкм (а) и 45 мкм (б) при наноструктурирующем выглаживании стали 20Х с силой $P_b = 350$ Н и $f_t = 0,35$

5. Выявление предельного количества фрикционно-силовых воздействий индентора (базовых циклов нагружения) на накопление пластической деформации в материале поверхностного слоя при неизменной кривой деформационного упрочнения.

6. Определение зависимости степени деформации Λ , накопленной мезообъемом материала поверхностного слоя детали за базовый цикл фрикционно-силового нагружения, от силы воздействия P_v и коэффициента трения f_r .

7. Выявление зависимости поврежденности поверхностного слоя ω от параметров фрикционно-силового нагружения при неизменной кривой деформационного упрочнения.

Таким образом, при движении индентора материал приповерхностного слоя детали испытывает знакопеременное нагружение типа одноосное сжатие – растяжение, а нижележащие области поверхностного слоя – знакопеременный сдвиг (рис. 3, б). Такой характер распределения напряжений может способствовать развитию ротационно-сдвигового характера деформирования материала при ОУО деталей и его наноструктурированию в поверхностном слое, благодаря чему существенно улучшаются такие эксплуатационные показатели деталей машин, как износостойкость, выносливость и коррозионная стойкость.

Цифровые модели

В работе разработаны цифровые структурно-логические модели определения деформаций в материале поверхностного слоя деталей после ОУО, включающие формулы для реализации вариационного принципа виртуальных перемещений. Использование этого принципа позволило применить критерий текучести Мизеса σ_{eg} и разработать программу конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния материала поверхностного слоя деталей после ОУО. Полученные аналитические выражения (9) и (19) позволяют в полной мере провести исследования интенсивности накопленных пластических деформаций, степени накопленных деформаций сдвига σ_{xy} , σ_{yy} и поврежденности поверхностного слоя детали. Представленные зависимости (7) – (10) и разработанная на их основе методика моделирования наноструктурирующей ОУО поверхностей деталей машин позволяют прогнозировать состояние поверхностного слоя после того или иного вида обработки и обоснованно назначать ее параметры и инструмент, обеспечивая, тем самым, их высокую работоспособность в экстремальных условиях эксплуатации. При этом возникает реальная возможность совмещения наноструктурирующей ОУО с модифицированием материала поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Доказать целесообразность использования для исследования напряженно-деформированного состояния материала в зоне пластического контакта индентора инструмента с обрабатываемой поверхностью детали при однократном и многократном фрикционно-силовом нагружении метода динамического конечно-элементного моделирования, позволяющего изучить физику наноструктурирующей ОУО.

2. Разработать и апробировать методику моделирования наноструктурирующей ОУО деталей машин, позволяющую оценить состояние материала поверхностного слоя и определить пути его структурообразования.

3. Показать, что возможно управление ротационно-сдвиговым характером деформирования материала при ОУО деталей и его одновременное наноструктурирование и модифицирование в поверхностном слое.

Список літератури:

1. Кучеряев Б.В. Механика сплошных сред (теоретические основы обработки давлением композитных металлов с задачами и решениями, примерами и упражнениями): учебник для вузов / Б.В. Кучеряев. – М.: Изд-во МИССИС. – 604 с.
2. Коновалов Д.А. Определение кривых деформационного упрочнения металлов по результатам вдавливания конических инденторов / Коновалов Д.А., Смирнов С.В., Коновалов А.В. // Дефектоскопия. – 2008. – №12. – С. 55 – 63.
3. Конечно-элементное моделирование наноструктурирующего выглаживания / Кузнецов В.П., Смолин И.Ю., Дмитриев А.И., Смирнов С.В., Макаров А.В., Киряков А.Е., Юровских А.С. // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – №6. – С. 87 – 97.
4. Смирнов С.В. Пластичность и деформируемость углеродистых сталей при обработке давлением / С.В. Смирнов, В.П. Швейкин. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2009. – 255 с.
5. Сегал В.М. Процессы обработки металлов интенсивной пластической деформацией / В.М. Сегал // Металлы. – 2006. – №5. – С. 130 – 141.

Надійшла до редакції 15.01.2014

V.I. Бутенко

МОДЕЛЮВАННЯ НАНОСТРУКТУРУЮЧОЇ ОБРОБНО-ЗМІЦНЮЮЧОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В статті розглянута можливість динамічного кінцево-елементного моделювання наноструктуруючої обробно-зміцнюючої обробки поверхонь деталей машин з метою виявлення особливостей фрикційно-силового вантаження матеріалу поверхневого шару. Аналіз напружено-деформованого стану матеріалу оброблюваної деталі та визначення параметрів управління пластичним структуроутворенням здійснювалось з використанням програми, у котрій моделюваний зразок поверхневого шару розглядався як прямокутник з заданими граничними умовами симетрії. Визначена гранична кількість базових циклів навантаження на накопичення пластичної деформації в матеріалі поверхневого шару при виборі раціональних режимів обробно-зміцнюючої обробки деталі.

Ключові слова: моделювання, поверхонь, деталь, матеріал, навантаження, деформація, обробка, інструмент.

V. I. Butenko

MODELING OF NANOSTRUCTURING HARDENING TREATMENT OF MACHINE PARTS SURFACES

The article considers a possibility of dynamic finite-element modeling of nanostructuring hardening treatment of machine parts surfaces aimed at revealing the features of frictional-force loading of the surface material. Analysis of deflected mode of the material and determination of parameters of structure formation control were carried out using a program, in which a modeled surface layer sample was considered as a rectangle with given boundary symmetry conditions.

Keywords: modeling, surface, part, material, loading, deformation, treatment, tool.