

УДК 539.3+621.7+621.923.6

Конечно-элементное моделирование наноструктурирующего выглаживания

В.П. Кузнецов, И.Ю. Смолин^{1,2}, А.И. Дмитриев^{1,2}, Д.А. Коновалов³,
А.В. Макаров³, А.Е. Киряков, А.С. Юровских⁴

Курганский государственный университет, Курган, 640669, Россия

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия

³ Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, 620219, Россия

⁴ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620002, Россия

В динамике проведено моделирование процесса выглаживания тонкого поверхностного слоя стального образца под внедряемым с постоянной силой и затем движущимся с постоянной скоростью индентором. Моделирование проведено с использованием метода конечных элементов в рамках приближения плоского деформированного состояния. Индентор моделировался абсолютно жестким телом, а для стали была принята модель упругопластического тела с изотропным упрочнением по экспериментально определенному закону. В работе исследованы закономерности изменения напряженно-деформированного состояния материала вблизи обрабатываемой поверхности и выявлены механизмы образования наноструктурированного слоя. Проведен анализ влияния коэффициента трения и силы выглаживания на высоту валика оттесненного материала. Результаты исследований находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными

Ключевые слова: наноструктурирующее выглаживание, поверхностный слой, конечно-элементное моделирование, циклическое знакопеременное воздействие

Finite element simulation of nanostructuring burnishing

V.P. Kuznetsov, I.Yu. Smolin^{1,2}, A.I. Dmitriev^{1,2}, D.A. Kononov³,
A.V. Makarov³, A.E. Kiryakov and A.S. Yurovskikh⁴

Kurgan State University, Kurgan, 640669, Russia

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634021, Russia

² National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia

³ Institute of Machine Science UrB RAS, Ekaterinburg, 620219, Russia

⁴ Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002, Russia

Dynamics simulation of burnishing of a thin steel layer beneath an indenter applied with a constant force and moving with a constant velocity was performed. The simulation was made by the finite element method in the approximation of a plane strain state. The indenter was modeled by a perfectly rigid body, and the steel was modeled by an elastoplastic body with isotropic hardening by an experimentally defined law. The regularities of changes of the stress-strain state of the material near the treated surface were studied and mechanisms of the formation of a nanostructured layer were disclosed. The effect of the friction coefficient and the burnishing force on the height of a roll of the edged material was analyzed. The results of studies agree well with experimental data.

Keywords: nanostructuring burnishing, surface layer, finite element simulation, cyclic alternate action

1. Введение

Одним из высокопроизводительных методов финишной обработки высокоточных деталей в машиностроении является выглаживание поверхностей на современных многоцелевых станках [1–18]. Известно, что

в результате сферического [5, 6, 10–13] или цилиндрического алмазного выглаживания [14–17] происходит пластическое деформирование и изменение структуры поверхностного слоя, что обеспечивает улучшение таких качественных и эксплуатационных свойств поверх-

ности, как шероховатость, твердость, износостойкость и усталостная прочность [5–9]. Алмазное выглаживание, основанное на применении инденторов с рабочей частью из природного или синтетического алмаза, характеризуется низким коэффициентом трения, поэтому в исследованиях с использованием алмазного выглаживания силой трения в контакте «индентор – обрабатываемая поверхность», как правило, пренебрегают.

Существенное повышение твердости, износостойкости и усталостной прочности поверхностей конструкционных сталей может быть достигнуто путем наноструктурирующего выглаживания, при котором высокий уровень сдвиговых деформаций достигается применением инденторов с повышенными коэффициентами трения и теплостойкости [6]. При наноструктурирующем выглаживании формируется увеличенный валик пластически оттесненного металла, являющийся микроконцентратором напряжений и способствующий процессу диспергирования структуры тонкого поверхностного слоя. Однако рост валика может привести и к дестабилизации динамической системы выглаживания, и возникновению автоколебаний [4, 18]. Таким образом, наноструктурирующее выглаживание поверхностей деталей из конструкционных сталей требует теоретического обоснования режимов, позволяющего управлять накоплением интенсивности пластических деформаций при сохранении динамической стабильности процесса. Кроме того, важным является установление влияния соотношения силы выглаживания и коэффициента трения материала индентора на характер деформационных процессов.

Отметим, что существующие теоретические модели [19–21], основанные на аналитическом описании, и численные модели в рамках статической постановки задачи, не дают возможности в полной мере воспроизвести реальную картину развития процессов, протекающих в тонком поверхностном слое в условиях выглаживания, тем более наноструктурирующего. Это обусловлено динамикой процесса, и крайне сложной картиной неоднородного распределения напряженно-деформированного состояния нагруженного материала. Чаще всего в таких расчетах используются различные приближения, которые позволяют получить интересующую информацию об исследуемом процессе лишь для частного случая. Так, в работе [21] для теоретического исследования обкатывания и выглаживания применен метод координатных сеток, который с позиции механики деформируемых сред и теории обработки металлов давлением позволяет анализировать изменение напряженно-деформированного состояния изотропного материала в области очага деформации (зоне контакта индентора с выглаживаемой поверхностью). Более предпочтительным является использование методов численного моделирования, основанных на интегрировании систе-

мы дифференциальных уравнений механики деформируемого твердого тела с учетом граничных условий и упругопластических свойств поверхностного слоя испытуемого материала.

Основным методом численного моделирования для исследования распределения напряжений и деформаций по-прежнему остается метод конечных элементов. До недавнего времени основные закономерности формирования поверхностного слоя деталей машин при упрочнении методами поверхностного пластического деформирования рассматривались в рамках статических и квазистатических постановок задач. Так, в работах [22–27] исследование методом конечных элементов схожих процессов цилиндрического выглаживания и фрикционной обработки поверхностного слоя осуществлено в условиях квазистатического деформирования при заданной постоянной глубине внедрения индентора. Отметим, что такая постановка задачи не совсем точно соответствует основным условиям процесса выглаживания. В целом, анализируя имеющуюся литературу, можно отметить, что по-прежнему остается не до конца понятной степень влияния основных параметров процесса выглаживания на формирование специфического напряженно-деформированного состояния материала вблизи обрабатываемой поверхности, а также на изменение структуры приповерхностного слоя конструкционных сталей, определяющей его функциональность.

Целью настоящих исследований являлось численное изучение процесса наноструктурирующего выглаживания и особенностей изменения напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя обрабатываемого образца с использованием динамического варианта метода конечных элементов. В работе моделирование процесса проведено в динамике и с заданием постоянного значения силы прижатия индентора. В этом состоит его основное отличие от традиционно используемых подходов к изучению напряженно-деформированного состояния приповерхностного участка. Основной задачей настоящих исследований являлось определение особенностей напряженно-деформированного состояния, способного обеспечить механизмы образования наноструктурированного приповерхностного слоя — фрикционно-сдвиговой и ротационный характер деформирования [28, 29]. Кроме того, решались следующие задачи:

- 1) исследование особенностей изменения напряженно-деформированного состояния материала на этапах внедрения индентора и его движения при одном и нескольких проходах;
- 2) анализ влияния силы выглаживания и коэффициента трения на высоту валика оттесненного материала;
- 3) исследование изменения величины накопленной пластической деформации поверхностного слоя в зависимости от количества проходов.

2. Геометрическая модель. Граничные условия

В работе в рамках двухмерной постановки задачи и условий плоскодеформированного состояния было проведено моделирование процесса выглаживания стального образца. Расчеты выполнены с использованием программы конечно-элементного анализа ANSYS/LS-DYNA. Нагружение осуществлялось в два этапа и задавалось путем расчета взаимодействия верхней грани деформируемого образца с индентором — абсолютно жестким телом с границей, представляющей собой часть сферы радиусом $R = 2$ мм. Сначала индентор вдавливался в образец с постоянной силой P , а затем при сохранении действия этой силы двигался с постоянной скоростью $V = 10$ м/мин. Расчетная схема представлена на рис. 1. Вверху на рисунке изображена часть индентора и схематически показаны сила выглаживания P и скорость перемещения индентора V . Нижний прямоугольник, обрамленный с трех сторон рамкой, соответствует части обрабатываемого образца с граничными условиями «непротекания» или симметрии (запрещено смещение перпендикулярно границам). Размер этой области составлял 4792×1995 мкм².

В расчетах варьировались значения коэффициента трения и силы выглаживания. При этом в рамках одного расчета выбранные значения коэффициента трения скольжения μ и силы выглаживания P были фиксированными. Исходная поверхность образца считалась идеально гладкой.

3. Конечно-элементная сетка

В работе были выбраны четырехугольные симплексы (четырёхузловые) элементы с линейной интерполяцией искоемых величин. При построении сетки было произведено ее сгущение снизу вверх так, чтобы у поверхности контакта обеспечить достаточно подробную сетку (рис. 2). Кроме того, сетка в горизонтальном направлении была разрежена на краях расчетной области, куда по условиям задачи не доходил центр индентора (рис. 2) и где не ожидалось резкого изменения напряженно-деформированного состояния. Таким образом, в начальный момент времени в верхней части нагружаемой области элементы были почти квадратными, а по краям и внизу — вытянутыми прямоугольниками. Коли-

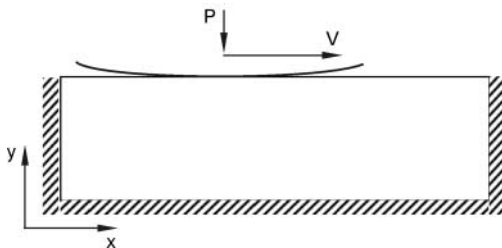


Рис. 1. Схематическое изображение моделируемого образца и условий нагружения

чество узлов в расчетной сетке достигало 53 352, количество элементов — 51 601.

4. Математическая модель и определяющие (физические) соотношения

Значения механических характеристик для образца были выбраны соответствующими стали 20Х: модуль Юнга $E = 218$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.267$, плотность $\rho = 7670$ кг/м³. Механическое поведение описывается упругопластической моделью с критерием текучести Мизеса и изотропным упрочнением. Поскольку во время реального процесса поверхность образца и индентор охлаждаются, образование тепла при трении и его влияние на прочностные характеристики стали не учитывались.

Для численного моделирования поведения обрабатываемого материала использовались уравнения с учетом геометрической и физической нелинейности, т.е. при деформировании учитывалась возможность больших перемещений, поворотов и деформаций, а для механического отклика материала — учет пластических деформаций. В этом случае задача решается в приращениях как для квазистатического случая вдавливания индентора, так и в случае движения индентора с постоянной скоростью. Для динамической задачи использовалась явная схема интегрирования по времени и приращения времени были малы из условия устойчивости численной схемы.

В основе математической постановки задачи лежит вариационный принцип виртуальных перемещений, который постулирует, что виртуальное изменение внутренней энергии деформаций должно компенсироваться таким же изменением внешней работы приложенных к телу нагрузок.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV = \int_S f_i^S \delta u_i dS + \int_V f_i^B \delta u_i dV,$$

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений Коши;

$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ — 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

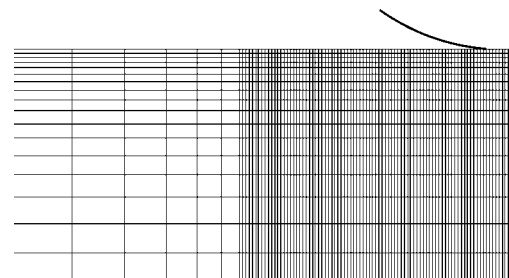


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки вблизи точки контакта индентора с поверхностью

сил (в том числе и инерционные силы); V — объем деформируемого тела; S — поверхность деформируемого тела, к которой приложено действие поверхностных сил.

Для реализации вариационного принципа виртуальных перемещений напряжения определяются через деформации. В этом случае используются определяющие соотношения (закон Гука для упругих тел и более сложные зависимости для упругопластических тел). В итоге задача сводится к системе уравнений для приращений перемещений.

Таким образом, на каждом шаге по времени из уравнения движения (или равновесия в случае статической задачи) определяется приращение перемещений du_i . По ним рассчитывается приращение полных деформаций $d\epsilon_{ij}$, которое можно разложить на приращения упругих и пластических деформаций:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^{pl}.$$

Приращения пластических деформаций определяются из закона пластического течения [20]

$$d\epsilon_{ij}^{pl} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}$$

с критерием текучести Мизеса

$$f(\sigma_{ij}) = \sigma_{\text{eq}} - \sigma_s(\epsilon_{\text{eq}}^{pl}) = \sqrt{3/2 s_{ij} s_{ij}} - \sigma_s(\epsilon_{\text{eq}}^{pl}),$$

где $\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{3/2 s_{ij} s_{ij}}$ — эквивалентные напряжения по Мизесу; $\sigma_s(\epsilon_{\text{eq}}^{pl})$ — предел текучести, который зависит от накопленных пластических деформаций $\epsilon_{\text{eq}}^{pl}$ в соответствии с заданной кривой упрочнения (рис. 3); $s_{ij} = \sigma_{ij} + P_s \delta_{ij}$ — девиатор тензора напряжений; P_s — давление; δ_{ij} — символ Кронекера.

Приращения упругих деформаций определяются как разность приращений полных и пластических деформаций, далее вычисляются приращения напряжений из закона Гука, записанного в приращениях:

$$d^J \sigma_{ij} = D_{ijkl} d\epsilon_{kl}^e,$$

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; $\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ — тензор поворота.

Для определения кривой упрочнения были проведены специальные эксперименты. Образец стали 20X был подвергнут следующей термообработке: цементация (толщина цементированного слоя — около 1.2 мм), закалка в масле, отпуск 250 °С в течение 2 ч. Испытания на кинетическое вдавливание инденторов проводили на твердомере ТЕСТ-МИНИ-(УТ) конструкции ВНИИАЭС.

Для восстановления кривой деформационного упрочнения по результатам кинетического индентирования использовали методику, изложенную в статье [30]. Диаграмму деформационного упрочнения аналитически

Таблица 1
Коэффициент c и параметры аппроксимации диаграммы деформационного упрочнения для стали 20X

Металл	Коэффициент $c \cdot 10^{-3}$ для пирамидальных инденторов			Коэффициенты аппроксимации		
	90°	123°	136°	σ_0 , МПа	a_1	a_2
Сталь 20X	51	114	210	1200	200	0.4

описывали в виде трехпараметрической степенной зависимости

$$\sigma_s = \sigma_0 (1 + a_1 \epsilon_{\text{eq}}^{pl})^{a_2}, \quad (1)$$

где σ_0 , a_1 , a_2 — эмпирические коэффициенты, σ_0 имеет смысл напряжения, соответствующего началу пластической деформации (предел текучести).

Участок нагружения при вдавливании пирамидальных и конических инденторов описывали параболической зависимостью, известной как закон Кика:

$$P = ch^2, \quad (2)$$

где коэффициент c зависит от угла индентора и упругопластических свойств материала, в который вдавливается индентор, и не зависит от глубины вдавливания.

Испытания проводили с использованием трех разных алмазных инденторов с углами при вершинах 90°, 123° и 136°. Для каждого индентора было проведено по 10 вдавливаний с записью диаграмм вдавливания. Значения коэффициента c в формуле (2) и полученные значения предела текучести σ_0 и коэффициентов a_1 , a_2 в аппроксимации (1) приведены в табл. 1. Диаграмма деформационного упрочнения приведена на рис. 3.

5. Представление результатов расчетов

Для анализа напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя использовались компоненты тензора напряжений в декартовой системе координат, представленной на рис. 1, давление P_s , эквивалентные напряжения по Мизесу (интенсивности напряжений)

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{3/2 s_{ij} s_{ij}}$$

и эквивалентные накопленные пластические деформации (интенсивности накопленных пластических деформаций)

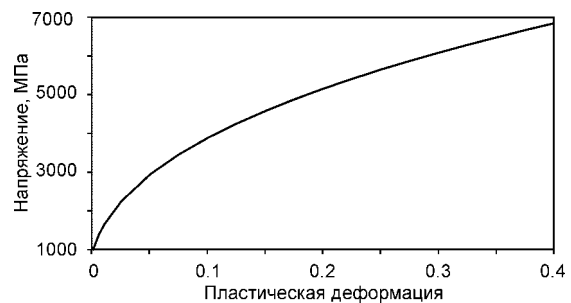


Рис. 3. Кривая упрочнения $\sigma_s(\epsilon_{\text{eq}}^{pl})$

$$\epsilon_{eq}^{pl} = \int \sqrt{2/3 \dot{\epsilon}_{ij}^{pl} \dot{\epsilon}_{ij}^{pl}} dt,$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}^{pl}$ — компоненты тензора скоростей пластических деформаций.

6. Результаты расчетов

6.1. Распределение напряжений и деформаций под индентором при вдавливании

На первом этапе был смоделирован процесс внедрения индентора в образец под действием постоянной силы в квазистатической постановке задачи.

При коэффициенте трения 0.35 и силе $P = 350$ Н глубина внедрения составила 65 мкм. На рис. 4 представлены распределения давления, интенсивности напряжений и интенсивности пластических деформаций в образце под индентором.

Как видно из рисунка, непосредственно под индентором находится область максимальных всесторонне сжимающих напряжений, а сдвиговые напряжения занимают область чуть больше вглубь и в стороны от пятна контакта. Причем максимальных значений касательные напряжения достигают под крайними точками пятна контакта, откуда прорастают полосы локализованной пластической деформации. Именно здесь следует ожидать формирование наибольшего числа структурных дефектов на стадии вдавливания. Вследствие значительного линейного упрочнения при малых пластических деформациях (рис. 3) полосы локализации имеют довольно «размытые» границы, а максимальные значения деформации в них составляют около 5%. При статическом нагружении максимальные пластические деформации распространяются на глубину порядка 230 мкм, а деформации около 0.5% отмечаются на глубине до 1400 мкм.

6.2. Накопление пластических деформаций при движении индентора

На следующем этапе нагружения моделировалось движение индентора с постоянной скоростью 10 м/мин в динамической постановке задачи. На рис. 5 представлена хронограмма распределений эффективных накопленных пластических деформаций в обрабатываемом образце при движении индентора. Видно, что впереди по ходу движения индентора сформировался валик отесненного материала. Пластические деформации в нем не велики, но вертикальные смещения максимальны. На хронограмме также можно проследить, что часть материала у поверхности увлекается индентором, поэтому положение точек 2 и 3 к последнему моменту времени оказалось ближе к правой границе вырезанной пространственной области.

Анализ изменения накопленных пластических деформаций показывает, что при динамическом нагружении под движущимся индентором возникают и накапливаются значительные пластические деформации. Так,

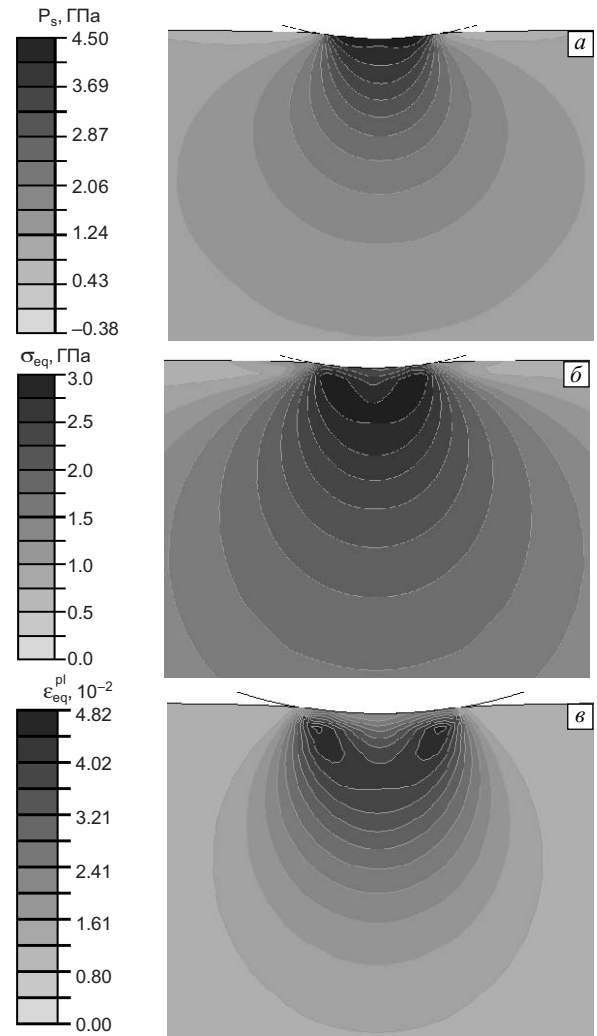


Рис. 4. Пространственное распределение давления (а), интенсивности напряжений (б) и интенсивности накопленных пластических деформаций (в) в исследуемом образце по окончании стадии вдавливания

в узком приповерхностном слое толщиной около 75 мкм они достигают порядка 100%. При распространении вглубь материала эти значения падают. Так, на глубине около 500 мкм они составляют около 10%.

Интересен характер накопления пластических деформаций при многократном проходе индентора, который сильно зависит от вида кривой упрочнения. Если кривая стремится к определенному предельному значению (выходит на насыщение), то деформации растут немонотонно. В случае кривой упрочнения, аппроксимированной степенной функцией, как на рис. 3, достаточно большое накопление пластических деформаций происходит уже при первом проходе и дальше они практически не растут (рис. 6). Это говорит о том, что большое количество проходов может оказаться не эффективным для упрочнения материала и достижения других его функциональных свойств.

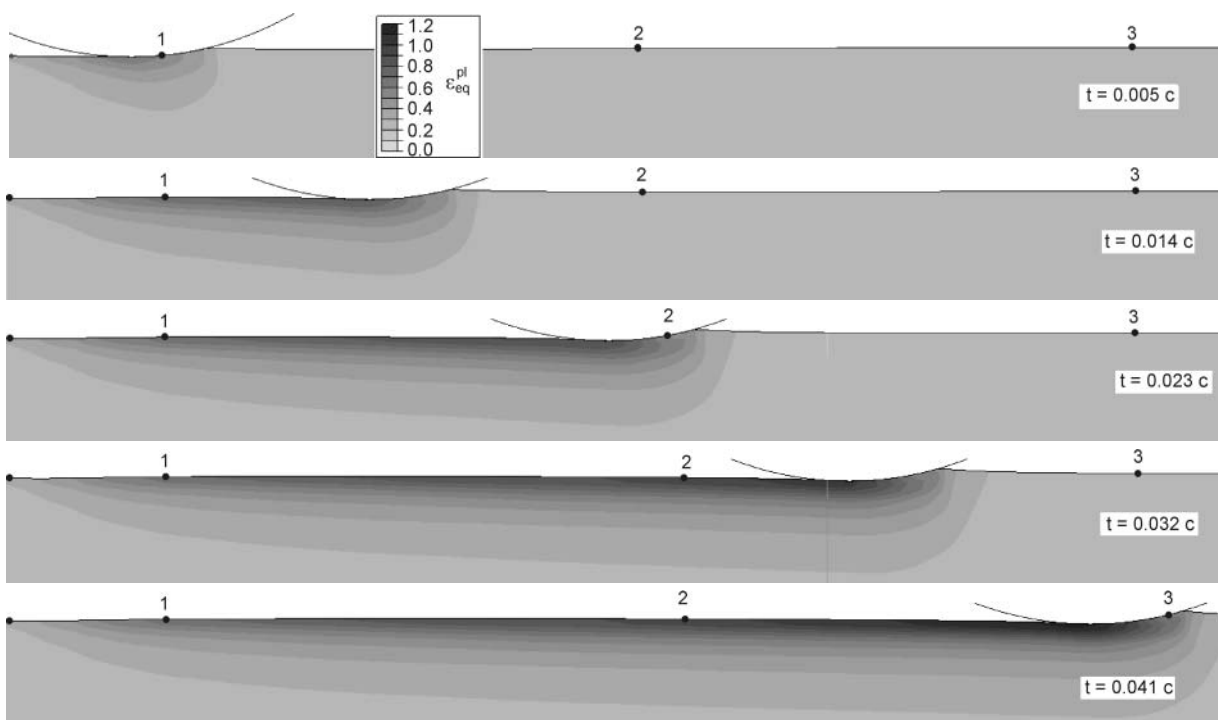


Рис. 5. Хронограмма распределения эквивалентных накопленных пластических деформаций. Толщина изображенного слоя — 580 мкм

Увеличение коэффициента трения и силы выглаживания, как и следовало ожидать, приводит к росту накопленных пластических деформаций тонкого поверхностного слоя, подвергнутого наноструктурирующему выглаживанию [6].

6.3. Влияние коэффициента трения и силы выглаживания на высоту валика оттесненного материала

На рис. 7 представлены графики зависимости от времени вертикальных перемещений в некоторых точ-

ках на поверхности образца, часть из которых выделены крупными черными точками и обозначены номерами на рис. 5. Эти данные получены для силы выглаживания 350 Н и коэффициента трения 0.3. Анализируя рис. 7, можно заметить, что еще до прихода индентора точки поверхности опускаются вниз, затем поднимаются вверх во время прохождения валика оттесненного материала по ним. Далее при прохождении индентора поверхность опускается вниз, но затем она опять подни-

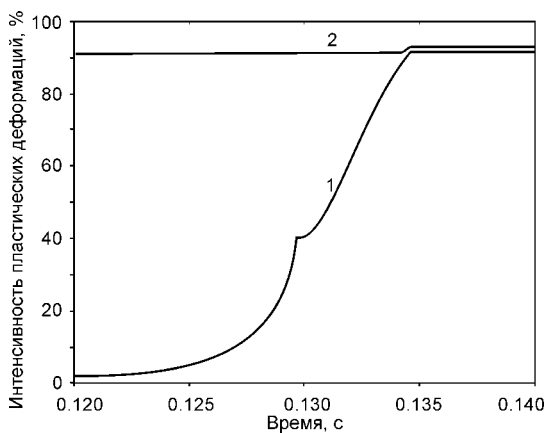


Рис. 6. Накопление пластических деформаций в точке в середине образца как функция времени и количества проходов индентора (числа, указанные около графиков). Время при каждом проходе начинается с нуля

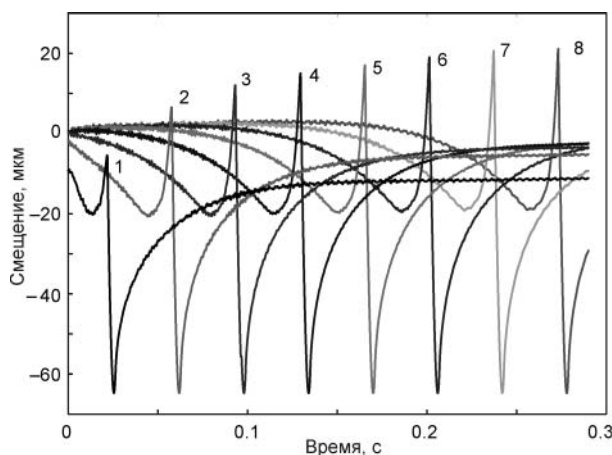


Рис. 7. Вертикальные перемещения точек поверхности при движении индентора. Числа у графиков соответствуют номерам равноудаленных точек, первые три из которых показаны на рис. 5. Чем больше номер графика, тем дальше расположена точка от начального положения индентора

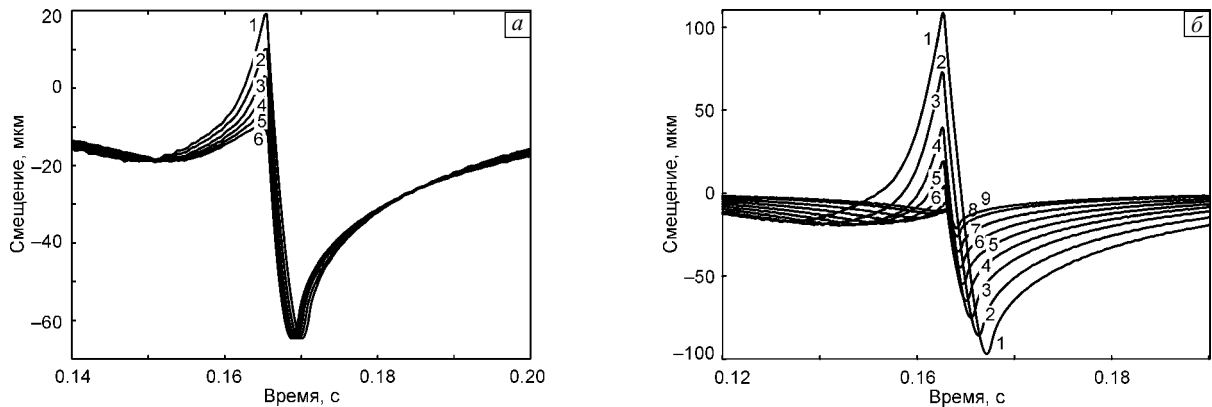


Рис. 8. Вертикальные смещения со временем одной и той же точки в середине выглаживаемой поверхности для разных коэффициентов трения $\mu = 0.35$ (1), 0.3 (2), 0.25(3), 0.2 (4), 0.15 (5), 0.1 (6) и одной силы выглаживания $P = 350$ Н (а) и для разных значений силы выглаживания $P = 500$ (1), 450 (2), 400 (3), 350 (4), 300 (5), 250 (6), 200 (7), 150 (8), 122.5 Н (9) и одного коэффициента трения $\mu = 0.35$ (б)

мается из-за наличия упругих деформаций. Графики 4 и 5 на рис. 7 соответствуют границе переходного участка (области стабилизации валика вытесненного материала), после которого перемещения точек поверхности практически не меняются. Точка № 5 расположена на расстоянии 2.7 см от начального положения индентора.

Анализ влияния коэффициента трения и силы выглаживания на высоту валика отгесненного материала проводился на графиках зависимостей вертикальных смещений одной и той же точки (№ 5) обрабатываемой поверхности (рис. 8). Высота валика определялась как разность максимального подъема в валике и самого глубокого погружения точки до прихода индентора.

Видно, что с ростом значений коэффициента трения и силы выглаживания увеличиваются и вертикальные смещения в валике отгесненного материала, но уменьшается упругое восстановление углубления материала вследствие индентирования. Максимальное углубление (внедрение) для одной силы имеет одно и то же значение, но для больших значений коэффициента трения смещается дальше от начала (материал увлекается за индентором).

Влияние обоих указанных параметров процесса выглаживания на формирование валика отгесненного материала представлено на рис. 9. Видно, что рост высоты

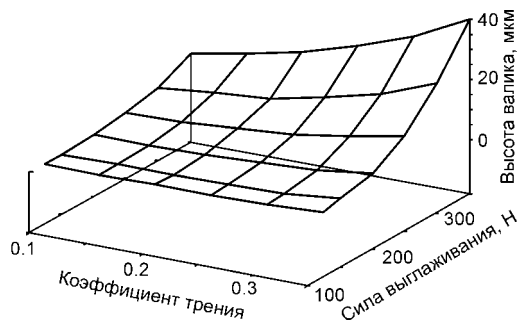


Рис. 9. Изменение высоты валика в зависимости от коэффициента трения и силы выглаживания

валика с увеличением коэффициента трения и силы выглаживания подчиняется нелинейной нарастающей зависимости. Из анализа данных проведенных расчетов также следует, что при малой силе выглаживания валик вообще практически не образуется при коэффициентах трения до 0.35. Дополнительные расчеты показали, что только при очень большом значении коэффициента трения ($\mu = 0.5$) материал немного отгесняется.

6.4. Распределение напряжений в очаге деформации

Поскольку валик отгесненного материала растет с увеличением как силы выглаживания, так и коэффициента трения, то, анализируя характер распределения напряжений, рассмотрим в первом случае ситуацию, когда величины обоих параметров велики (коэффициент трения — 0.35 и сила выглаживания — 350 Н), а во втором — малы (коэффициент трения — 0.07 и сила выглаживания — 122.5 Н).

На рис. 10, а показаны положение индентора и деформированная сетка конечных элементов, а также двумерное распределение сдвиговых напряжений σ_{xy} в расчетной области. На рис. 10, б и в представлены графики компонент тензора напряжений σ_{xx} , σ_{yy} и σ_{xy} , а также давления P_s и эквивалентных напряжений σ_{eq} вдоль двух линий, которые отмечены маркерами на рис. 10, а. По оси абсцисс отложено расстояние от края маркированной линии вдоль оси x .

Анализируя напряжения в приповерхностных слоях очага деформации, следует отметить, что нормальные напряжения вдоль направления движения индентора σ_{xx} перед индентором (справа от него) отрицательные, т.е. материал сжимается вдоль оси x перед индентором. В очаге деформации характер напряжений меняется постепенно на противоположный (они становятся положительными), т.е. за индентором материал растягивается (увлекается индентором из-за трения). Только в очаге деформации материал сжимается вдоль вертикальной оси, а вне очага деформации компоненты на-

пряжений σ_{yy} практически нулевые. Немного впереди очага и непосредственно в нем действуют положительные сдвиговые напряжения. Рост всестороннего сжатия начинается перед валиком (материал сжимается вследствие наезда индентора), достигает максимума за валиком (где индентор давит на валик) и далее давление P_s остается сжимающим во всем очаге деформации, сменяясь на растяжение за индентором, вследствие увлечения поверхностного слоя материала за индентором из-

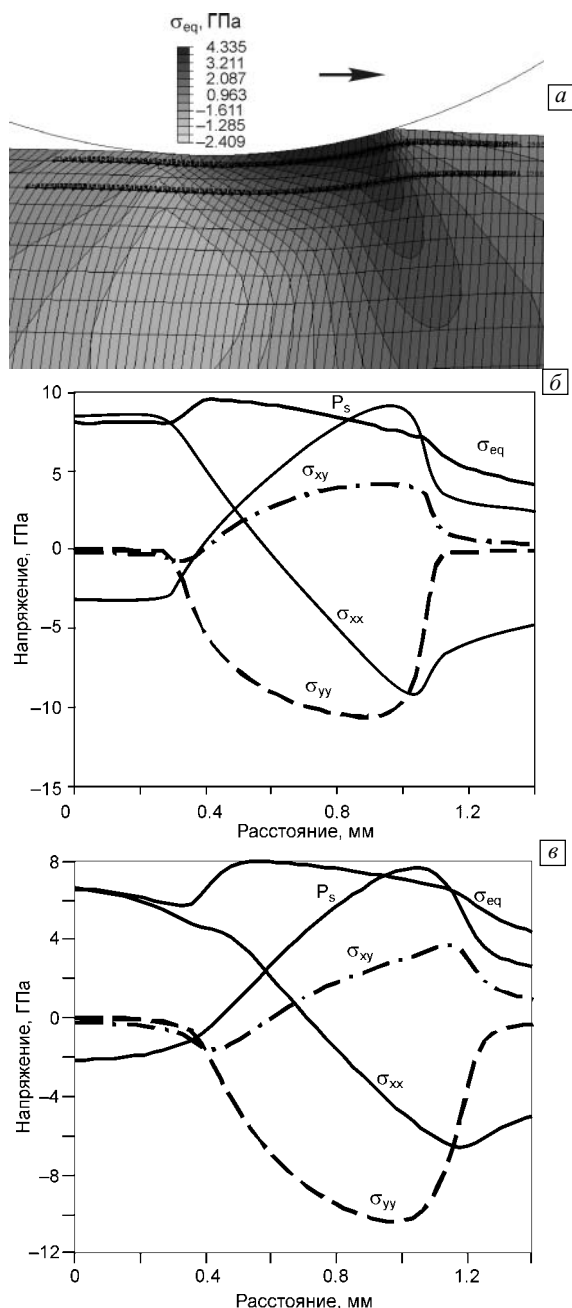


Рис. 10. Распределение сдвиговых напряжений в очаге деформации (а) и различных напряжений вдоль двух линий у поверхности (отмечены маркерами на рисунке а): б — для верхней линии, в — для нижней линии при большом валике оттесненного материала. Стрелкой показано направление движения индентора

за трения. Еще перед индентором происходит изменение формы. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу, изменяющие форму, имеют место в очаге деформации, и остаются там практически постоянными.

В целом, совместный анализ всех компонент напряжений свидетельствует о том, что в самых близких слоях к поверхности перед очагом деформации напряженное состояние подобно одноосному сжатию, а после очага ситуация схожа с одноосным растяжением. В самом очаге реализуется сложное напряженное состояние.

В более глубоком слое материала напряженное состояние за индентором иное. Видно, что нижняя линия маркеров на рис. 10, а пересекает не только область положительных сдвиговых напряжений справа (клин), но и область отрицательных сдвиговых напряжений слева под индентором. Именно такие картины приведены и в монографии [21]. Это является отражением того, что при вертикальном внедрении индентора (без его движения вдоль поверхности) образуются две области: одна — отрицательных, а другая — положительных сдвигов, которые расположены симметрично относительно оси индентора. При движении индентора вдоль поверхности эта симметрия нарушается и картина распределения сдвиговых напряжений превращается в изображенную на рис. 10, а.

Такой характер распределения напряжений может служить объяснением ротационно-сдвигового характера деформирования в поверхностном слое, поскольку при движении индентора самые верхние области у поверхности испытывают знакопеременное нагружение, близкое к одноосному сжатию-растяжению, а области, расположенные глубже от поверхности, испытывают знакопеременное сдвиговое нагружение. В верхних поверхностных слоях при этом пластические деформации больше, чем в более глубоких слоях материала.

Другим следствием анализа распределений напряжений является вывод о возможности разрушения поверхностного слоя при больших значениях коэффициента трения, поскольку растягивающие нормальные напряжения могут превысить предел прочности материала.

Теперь рассмотрим особенности распределения напряжений в очаге деформации, когда валика практически нет: сила выглаживания $P = 122.5$ Н, коэффициент трения — 0.07.

На рис. 11 представлена та же информация, что и на рис. 10, но для случая, когда валик очень мал. В этом случае для близких к поверхности слоев распределение компонент напряжений качественно соответствует тому, что было для большого валика. Отличие имеется только в сдвиговых напряжениях σ_{xy} , для которых наблюдается распределение, более близкое к антисимметричному относительно вершины индентора. Для более глубокого слоя видно качественное отличие в распределении нормальной компоненты напряжений σ_{xx} — в этом случае

нет перехода от сжатия перед индентором к растяжению за ним. Все слои подвергнуты сжатию.

В целом следует отметить, что качественно картины распределения напряжений, полученные в расчетах, соответствуют результатам численно-экспериментальных исследований [21]. Основные отличия наших результатов от приведенных в работе [21] состоят в отсутствии отрицательных сдвиговых напряжений в самых верхних слоях при большом валике и смене знака

продольных нормальных напряжений в самых верхних слоях при маленьком валике и в более глубоких слоях при большом валике. Однако эти особенности вполне объяснимы в условиях совместного действия сил выплаживания и трения, а также с учетом динамической постановки задачи и могут объяснить механизм возникновения наноструктурированного слоя.

7. Обсуждение и выводы

Наиболее важным результатом данной работы является выявление условий, способствующих формированию наноструктурированного приповерхностного слоя в процессе выплаживания. В частности, анализ результатов численного моделирования показал, что при прохождении индентора по выплаживаемой поверхности область материала вблизи индентора испытывает сложное напряженно-деформированное состояние, которое в динамике имеет знакопеременный характер. Так, материал вблизи свободной поверхности перед индентором находится в условиях сжимающих напряжений, а после прохождения индентора напряжения меняют знак на противоположный, т.е. возникает область растягивающих напряжений. На большей глубине это проявляется в смене знака сдвиговых напряжений. С учетом многократного прохода индентора по поверхности обрабатываемой детали во время ее вращения на станке получается циклическая знакопеременная нагрузка приповерхностных слоев материала. Как отмечается в работах [31, 32], для известных методов интенсивной пластической деформации, приводящих к образованию объемных наноструктурных металлических материалов, характерны большие степени сдвиговой деформации с переменной напряженным состоянием. На подобную возможность для фрикционной упрочняющей обработки стальной поверхности указывают также авторы работ [26, 27, 33].

Экспериментальное подтверждение образования наноструктурированных слоев при выплаживании отмечено в работе [6]. Так, просвечивающая электронная микроскопия показывает, что в тонком поверхностном слое цементированной стали 20X, подвергнутой наноструктурирующему выплаживанию индентором с высоким коэффициентом трения ($K_f = 0.35$), возникает однородная ультрадисперсная структура с размерами кристаллитов α -мартенсита 20–50 нм (рис. 12, б, в). Вид микроэлектрограмм, имеющих форму сплошных колец Дебая, свидетельствует о разориентировке отдельных фрагментов на углы, достигающие нескольких десятков градусов. Развитие механизма ротационной пластичности при наноструктурирующем выплаживании поверхности стали 20X обеспечило формирование нанокристаллических структур в поверхностном слое на глубине до 5–7 мкм (рис. 12, а).

Таким образом, распределение накопленных пластических деформаций и напряжений в верхних слоях вы-

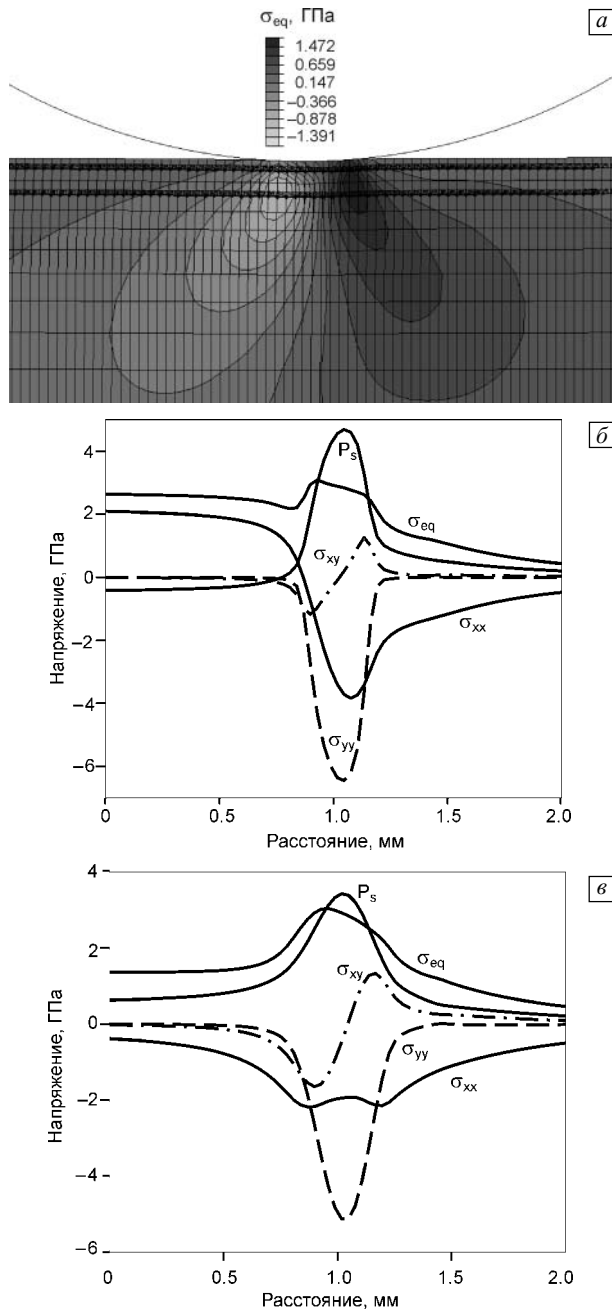


Рис. 11. Распределение сдвиговых напряжений в очаге деформации (а) и различных напряжений вдоль двух линий у поверхности (отмечены маркерами на рисунке а): б — для верхней линии, в — для нижней линии при малом валике отгесненного материала

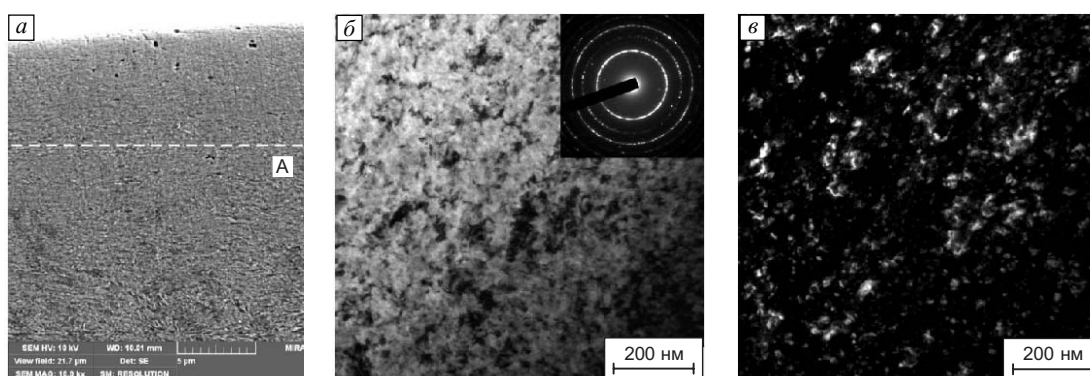


Рис. 12. Сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия тонкого поверхностного слоя цементованной стали 20X, подвергнутой обработке наноструктурирующим выглаживанием инструментом с узлом динамической стабилизации на токарно-фрезерном центре: А — граница наноструктурированного слоя

глаживаемой поверхности показывает, что в узком приповерхностном слое реализуется некий своеобразный вариант метода интенсивной пластической деформации. Именно такой характер воздействия на материал поверхностного слоя и может приводить к формированию нанозернистой структуры при обработке выглаживанием. Результаты численного моделирования показали, что глубина поверхностного слоя, подверженная внешнему воздействию, определяется параметрами процесса: силой выглаживания и коэффициентом трения. Так, рост коэффициента трения приводит к увеличению сдвиговых напряжений и накопленной пластической деформации, что способствует формированию наноструктурных состояний. С другой стороны, при очень высоких значениях коэффициента трения может происходить смена режима процесса выглаживания с прерыванием контакта и разрушением материала поверхностного слоя.

В заключение отметим, что результаты исследований, полученные в настоящей работе при квазистатической постановке задачи, хорошо согласуются с результатами других авторов, что говорит о корректности используемой физической модели процесса. Результаты, полученные в динамике, дают качественно новую информацию об особенностях поведения материала под нагрузкой. Они позволяют проанализировать распределение напряжений и деформаций, реализуемых в нагруженном материале в условиях, близких к тем, что возникают при выглаживании поверхности металлических материалов, выявить влияние силы выглаживания, размеров и формы индентора, коэффициента трения контактирующей пары на глубину и свойства наноструктурированного слоя. Анализ результатов моделирования позволил выявить основные параметры и режимы обработки, при которых возможна реализация механизмов, ответственных за формирование наноструктурированного слоя.

Основные результаты исследований можно сформулировать следующим образом.

Выявлена роль продольных нормальных и сдвиговых составляющих напряжений с точки зрения параметров, обеспечивающих наноструктурирование слоев материала различной толщины.

Показано, что увеличение коэффициента трения при выглаживании обуславливает рост сдвиговых деформаций в поверхностном слое. Изменение амплитуды и знака этих деформаций по глубине обеспечивает ротационно-сдвиговый механизм наноструктурирующего выглаживания с высоким трением.

Установлено, что накопление пластических деформаций в поверхностном слое при многократном воздействии возрастает сугубо неравномерно.

Показано, что управление процессом наноструктурирования возможно подбором соотношения удельного давления в пятне контакта индентора с поверхностью и коэффициента трения.

Ограничивающим фактором наноструктурирующего выглаживания является формирование опасных напряжений растяжения-сжатия в очаге деформации, которые могут привести к разрушению поверхности.

Дальнейший анализ структурных изменений, протекающих в тонком поверхностном слое, подразумевает проведение дополнительных исследований, в том числе с использованием методов численного моделирования на более низком масштабном уровне.

Работа выполнена при частичной поддержке проектов №№ 09-Т-1-1002 и 13.3 по программе ОЭММПУ РАН № 13, интеграционного проекта СО РАН № 127 со сторонними организациями и гранта РФФИ № 11-08-01025-а.

Литература

1. Korzynski M., Pacana A. Centreless burnishing and influence of its parameters on machining effects // J. Mater. Process. Tech. – 2010. – V. 210. – No. 9. – P. 1217–1223.
2. Sharman A.R.C., Aspinwall D.K., Dewew R.C., Bowen P. Workpiece surface integrity considerations when finish turning gamma titanium aluminide // Wear. – 2000. – V. 294. – P. 473–481.

3. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Губанов В.Ф., Схиртладзе А.Г. Обеспечение требуемого качества поверхностей деталей на основе управления динамической системой процесса выглаживания: Учебное пособие. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005. – 85 с.
4. Кузнецов В.П. Методика определения параметров инструмента для упругого выглаживания деталей на основе моделирования нелинейной динамики процесса // Машиностроение и инженерное образование. – 2009. – Т. 20. – № 3. – С. 18–26.
5. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Саврай Р.А., Поздеева Н.А., Малыгина И.Ю., Киряков А.Е. Формирование высококачественных поверхностей деталей из коррозионностойкой стали выглаживанием специальным инструментом с узлом динамической стабилизации на токарно-фрезерном центре // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 8. – С. 3–15.
6. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Поздеева Н.А., Саврай Р.А., Юровских А.С., Малыгина И.Ю., Киряков А.Е. Повышение прочности, теплостойкости и износостойкости деталей из цементированной стали 20Х наноструктурирующим фрикционным выглаживанием на токарно-фрезерных центрах // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 9. – С. 3–13.
7. Hamadache H., Laouar L., Zeghib N.E., Chaoui K. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing // J. Mater. Process. Tech. – 2006. – V. 180. – P. 130–136.
8. Loh N.H., Tam S.C., Miyazawa S. Surface hardening by ball burnishing // Proc. Eng. – 1990. – V. 23. – No. 6. – P. 413–417.
9. Michael P.C., Saka N., Rabinowicz E. Burnishing and adhesive wear of an electrically conductive polyester-carbon film // Wear. – 1989. – V. 132. – No. 2. – P. 265–285.
10. Hassan A.M. The effect of ball and roller burnishing on the surface roughness of some non-ferrous metals // J. Mater. Process. Tech. – 1997. – P. 385–391.
11. Shiou F.J., Hsu C.C. Surface finishing of hardened and tempered stainless tool steel using sequential ball grinding, ball burnishing and ball polishing processes on a machining centre // J. Mater. Process. Tech. – 2008. – V. 205. – No. 1–3. – P. 249–258.
12. Korzynski M. A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction // J. Mater. Process. Tech. – 2009. – V. 209. – No. 1. – P. 625–633.
13. Shiou F.J., Chuang C.H. Precision surface finish of the mold steel PDS5 using an innovative ball burnishing tool embedded with a load cell // Precis. Eng. – 2010. – V. 34. – No. 1. – P. 76–84.
14. Luo H., Liu J., Wang L., Zhong Q. Study of the mechanism of the burnishing process with cylindrical polycrystalline diamond tools // J. Mater. Process. Tech. – 2006. – V. 180. – No. 1–3. – P. 9–16.
15. Korzynski M., Lubas J., Swirad S., Dudek K. Surface layer characteristics due to slide diamond burnishing with a cylindrical-ended tool // J. Mater. Process. Tech. – 2011. – V. 211. – P. 84–94.
16. Schneider G., Jr. Cutting Tool Applications. Chapter 1. – Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall Publication, 2002. – P. 2–65.
17. Одицов В.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
18. Кузнецов В.П. Имитационное моделирование влияния параметров технологической системы на виброустойчивость выглаживания поверхностей деталей // Металлообработка. – 2010. – Т. 55. – № 1. – С. 7–15.
19. Пишбильский В. Технология поверхностной пластической обработки. – М.: Металлургия, 1991. – 478 с.
20. Кучеряев Б.В. Механика сплошных сред (Теоретические основы обработки давлением композитных металлов). – М.: МИСИС, 2000. – 320 с.
21. Смелянский В.М. Механика упрочнения материалов поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
22. Sartkulvanich P., Altan T., Jasso F., Rodriguez C. Finite element modeling of hard roller burnishing: An analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses // J. Manuf. Sci. Eng. – 2007. – V. 129. – Iss. 4. – P. 705 (12 pages).
23. Yen Y.C., Sartkulvanich P., Altan T. Finite element modeling of roller burnishing process // CIRP Annals Manuf. Technol. – 2005. – V. 54. – Iss. 1. – P. 237–240.
24. Courtin S., Henaff-Gardin C., Bezine G. Finite element simulation of roller burnishing in crankshafts // Transactions on Engineering Sciences. – 2003. – V. 39. – P. 333–342.
25. Klocke F., Bäcker V., Wegner H., Zimmermann M. Finite element analysis of the roller burnishing process for fatigue resistance increase of engine components // Proc. Inst. Mech. Engrs, Part B: J. Engng Manuf. – 2011. – V. 225. – No. 1. – P. 2–11.
26. Makarov A.V., Savrai R.A., Pozdejeva N.A., Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Korshunov L.G., Malygina I.Yu. Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension // Surf. Coat. Tech. – 2010. – V. 205. – P. 841–852.
27. Вичужанин Д.И., Макаров А.В., Смирнов С.В., Поздеева Н.А., Малыгина И.Ю. Напряженно-деформированное состояние и поврежденность при фрикционной упрочняющей обработке плоской стальной поверхности скользящим цилиндрическим индентором // Проблемы машиноведения и надежности машин. – 2011 (в печати).
28. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Наноструктурные состояния в твердых телах // ФММ. – 2010. – Т. 110. – № 5. – С. 486–496.
29. Панин В.Е., Панин А.В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 5. – С. 7–15.
30. Коновалов Д.А., Смирнов С.В., Коновалов А.В. Определение кривых деформационного упрочнения металлов по результатам вдавливания конических индентором // Дефектоскопия. – 2008. № 12. – С. 55–63.
31. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
32. Valiev R.Z., Estrin Yu., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J., Zhu Yu.T. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation // JOM. – 2006. – V. 4. – P. 33–39.
33. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 479 с.

Поступила в редакцию
08.06.2011 г.

Сведения об авторах

Кузнецов Виктор Павлович, к.т.н., зав. каф. КГУ, wpkuzn@mail.ru
 Смолин Игорь Юрьевич, д.ф.-м.н., внс ИФПМ СО РАН, проф. ТГУ, smolin@ispms.tsc.ru
 Дмитриев Андрей Иванович, д.ф.-м.н., доц., внс ИФПМ СО РАН, проф. ТГУ, dmitr@ispms.tsc.ru
 Коновалов Дмитрий Анатольевич, к.т.н., нс ИМАШ УрО РАН, SatterKein@yandex.ru
 Макаров Алексей Викторович, д.т.н., рук. лаб. ИМАШ УрО РАН, makarov@imach.ru
 Киряков Александр Евгеньевич, инж. КГУ, kirjakoff@rambler.ru
 Юровских Артем Сергеевич, к.т.н., доц. УФУ, artem.yurovskikh@mail.ru