

УДК 621.787.4

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-28-36

Влияние направления и геометрии рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние при осциллирующем выглаживании цилиндрических деталей

С.А. Зайдес, Ван Хинь Нгуен

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск,
Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83

The Influence of the Direction and Geometry of the Working Tool on the Stress-Strain State of Cylindrical Parts in Oscillating Burnishing

S.A. Zaides, Van Hinh Nguyen

Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83



e-mail: zsa@istu.edu, nguyenvanhinhck@gmail.com

i Рассмотрена отделочно-упрочняющая технология цилиндрических деталей типа валов осциллирующим выглаживанием. На основе компьютерного моделирования разработана конечно-элементная модель осциллирующего выглаживания для определения напряженного состояния в очаге деформации и упрочненных деталях в зависимости от угла поворота и профильного радиуса рабочего инструмента. Рост профильного радиуса от 1 до 8 мм приводит к повышению максимальных остаточных эквивалентных напряжений сжатия на 45 %. При положительном угле поворота инструмента (когда его направление совпадает с направлением продольной подачи), равном 45°, сжимающие остаточные напряжения достигают минимального значения. При увеличении угла поворота рабочего инструмента от -30 до -85° в направлении, противоположном направлению продольной подачи, эти напряжения резко возрастают, а качество поверхностного слоя снижается. При разных профильных радиусах инструмента глубина упрочненного слоя может изменяться на 34 %, а при разных углах его поворота — на 70...75 %.

Ключевые слова: осциллирующее выглаживание, остаточные напряжения, глубина пластической зоны, очаг деформации, угол поворота инструмента, профильный радиус инструмента

i The finishing and hardening technology for cylindrical parts of the shaft type by oscillating burnishing is considered in this article. Using computer simulation, a finite element model of oscillating burnishing is developed to determine the stress-strain state in the deformation zone and the hardened parts depending on the rotational angle and the profile radius of the working tool. An increase in the profile radius from 1 to 8 mm results in an increase in the maximum residual equivalent compressive stresses by 45 %. With a positive rotational angle of the tool (when its direction coincides with the direction of the longitudinal feed), equal 45°, the residual compressive stresses reach the minimum value. When the rotational angle

of the tool is increased from -30° to -88° in the direction opposite to the direction of the longitudinal feed, the residual stresses increase sharply, and the quality of the surface layer deteriorates. The depth of the hardened layer can vary by 34 % for different profile radii of the deforming tool, and by 70–75 % at different rotational angles of the tool.

Keywords: oscillating burnishing, residual stresses, depth of the plastic zone, deformation zone, rotational angle of the working tool, profile radius of the tool

Постановка вопроса. Осциллирующее выглаживание является одним из методов повышения качества поверхностного слоя деталей машин [1]. С помощью этого метода можно проводить чистовую отделочную, упрочняющую и калибрующую обработки. При достаточной производительности осциллирующее выглаживание позволяет получать изделия с улучшенными эксплуатационными свойствами: высоким качеством поверхностного слоя, повышенной опорной способностью профиля созданной поверхности, упрочненным поверхностным слоем и формированием в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия.

Метод дает возможность достигнуть точности 6–7 квалитетов и шероховатости $Ra = 0,16 \dots 0,02$ мкм. Характеристики микрогеометрии выглаженных поверхностей по сравнению с таковыми у поверхностей, обработанных иными методами отделочной обработки, также подтверждают эффективность метода [2–5].

Сущность выглаживания заключается в том, что рабочий инструмент (РИ) с заданными геометрическими характеристиками рабочей части при установленных технологических режимах процесса обработки внедряется в поверхностный слой заготовки и скользит, пластически деформируя микронеровности, образованные на предшествующих операциях. В результате повышается качество поверхностного слоя, способствующее увеличению надежности машин и оборудования [3–7]. Вследствие пластического скольжения изменяются физико-механические свойства полученной поверхности.

Управление напряженным состоянием при обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД) имеет большое значение при изготовлении деталей машин. Напряженное состояние является характеристикой качества поверхности, оказывающей существенное влияние на надежность деталей машин. Например, при изготовлении тонкостенных деталей иногда требуется снижать напряженное состояние в очаге пластической деформации, чтобы в процессе формообразо-

вания исключить перенаклеп или повышение твердости поверхностного слоя [8–10].

Исследования влияния профильного радиуса ролика и диаметра рабочего шарика на качество поверхностного слоя, приведенные в трудах [3, 4, 11–13], позволили установить, что с ростом площади контакта (при прочих равных условиях) глубина залегания остаточных напряжений сжатия становится больше. Их максимальное значение возрастает при увеличении диаметра шара и профильного радиуса ролика. Эти изменения связаны с площадью контактной поверхности.

Напряженное состояние при ППД в зависимости от кинематики процесса рассмотрено в статье [14]. Исследованию напряженно-деформированного состояния в очаге пластической деформации при ППД в стесненных условиях посвящена статья [15]. Управление остаточными напряжениями при охватывающем ППД описано в публикации [16], а моделирование остаточных напряжений при обкатке ролика — в работах [11, 12].

Осциллирующее выглаживание является новым технологическим процессом ППД, где использованы новые форма деформирующего инструмента и кинематика нагружения.

Цель работы — исследование влияния угла поворота и профильного радиуса РИ на напряженное состояние в очаге деформации и на остаточные напряжения сжатия после упрочнения деталей машин.

Конечно-элементная модель процесса. Принципиальная схема осциллирующего выглаживания и конструкция установки, на которую получен патент РФ, изложены в работе [17]. Для исследования влияния направления и геометрии РИ на напряженное состояние в очаге деформации рассмотрены два его параметра — профильный радиус скругления $R_{пр}$ и угол поворота α . Первый изменяли в пределах 1...8 мм, второй — в интервале $-85 \dots +85^\circ$ (рис. 1). Принято, что положительное направление РИ совпадает с направлением продольной подачи S , а отрицательное — противоположно ей (на рис. 1 угол α имеет знак «+»).

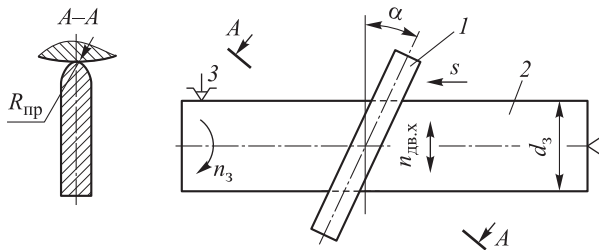


Рис. 1. Кинематическая схема локального нагружения при осциллирующем выравнивании:
1 — РИ; 2 — заготовка

Для анализа напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при упрочнении осциллирующим выравниванием использовали компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов. Одной из универсальных и широко применяемых программ, реализующих этот метод, является программа ANSYS [18–20], предназначенная для математического моделирования различных физических процессов.

Моделирование процесса обкатки в программе ANSYS позволяет определить все необходимые параметры: напряженно-деформированное состояние заготовки и инструмента в любой точке и в любой момент времени, что необходимо при разработке оптимального технологического процесса и для глубокого анализа и понимания явлений, происходящих в заготовке при пластическом течении материала.

Для проведения расчетов в программе ANSYS построена конечно-элементная модель в виде цилиндра и пластины (рис. 2). РИ 1 совершает осциллирующее вертикальное движение с частотой $n_{дв.х}$ относительно оси заготовки

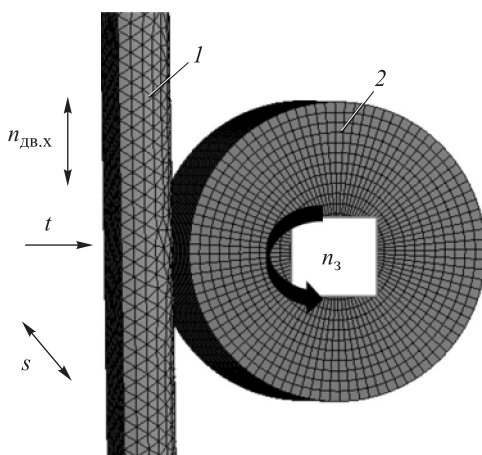


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса осциллирующего выравнивания цилиндрических деталей:
1 — РИ; 2 — обрабатываемая заготовка

и перемещается в осевом направлении по направлению продольной подачи S , а также прижимается к вращающейся обрабатываемой заготовке 2.

Параметры моделирования: конечно-элементная форма — гексаэдр; конечно-элементная модель содержала 7616 элементов и 39864 узлов; контакт с трением $f = 0,1$; граничное условие — фиксирование продольной оси заготовки. Режимы обработки: частота вращения заготовки $n_3 = 100 \text{ мин}^{-1}$; частота осцилляции РИ $n_{дв.х} = 30 \text{ дв. ход/мин}$; натяг $t = 0,1 \text{ мм}$; амплитуда осцилляции РИ $e = 30 \text{ мм}$; продольная подача РИ $S = 0,11 \text{ мм/об}$; угол поворота инструмента $\alpha = -85 \dots +85^\circ$; профильный радиус РИ $R_{пр} = 1 \dots 8 \text{ мм}$.

Характеристики образца: форма поверхности — цилиндрическая диаметром $d = 20 \text{ мм}$; материал — упругопластическая упрочняющая сталь 45; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала — билинейная, описываемая пределом текучести $\sigma_T = 360 \text{ МПа}$, временным сопротивлением разрыву $\sigma_B = 600 \text{ МПа}$, модулем упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

Характеристики РИ: материал — быстрорежущая сталь Р18; модуль упругости $E = 2,28 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Результаты моделирования. Напряженно-деформированное состояние материала при деформационном упрочнении можно разделить на временное и остаточное. Первое возникает при действии внешних сил, второе — при их отсутствии. Временные напряжения воздействуют на энергосиловые характеристики процесса, степень и глубину упрочненного слоя, давление в зоне контакта, шероховатость поверхности заготовки, прочность и стойкость РИ. Остаточные напряжения влияют на эксплуатационные характеристики деталей машин: усталостную прочность, коррозию, износостойкость и стабильность формы. Напряженное состояние в объеме тела характеризуется осевыми σ_z , тангенциальными σ_ϕ и радиальными σ_r напряжениями. Напряженное состояние в любой точке тела удобно оценивать по эквивалентному напряжению $\sigma_{эkv}$, которое можно рассчитать по формуле [8]

$$\sigma_{эkv} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_z - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2]}.$$

Определение остаточных напряжений. В качестве примера на рис. 3 показано распределение остаточных напряжений по сечению упрочненного цилиндрического образца ($R_{пр} = 2$ мм; $\alpha = +60^\circ$; $t = 0,10$ мм).

Установлено, что при осциллирующем выглаживании формируются остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое и остаточные напряжения растяжения в центральной зоне заготовки. Максимальное остаточное напряжение сжатия наблюдается на расстоянии 1,6...1,8 мм от поверхности цилиндра.

На рис. 4, а показана зависимость максимальных радиального, тангенциального и осевого остаточных напряжений в поверхностном слое от профильного радиуса РИ, а на рис. 4, б — зависимость максимальных временного и остаточного эквивалентных напряжений от профильного радиуса РИ.

Результаты компьютерного моделирования показали, что при увеличении профильного радиуса РИ от 1 до 8 мм остаточные эквивалентные напряжения сжатия повышаются на 45 %. При постоянном натяге с ростом $R_{пр}$ возрастают контактная поверхность и контактное давление. Чем выше контактное давление, тем больше остаточные напряжения. Это позволяет объяснить некоторую разницу в значениях остаточных напряжений при изменении профильного радиуса РИ [3].

На рис. 5, а приведена зависимость максимальных остаточных напряжений в поверхностном слое от угла поворота РИ, а на рис. 5, б — зависимость максимальных временного и остаточного эквивалентных напряжений от угла поворота РИ.

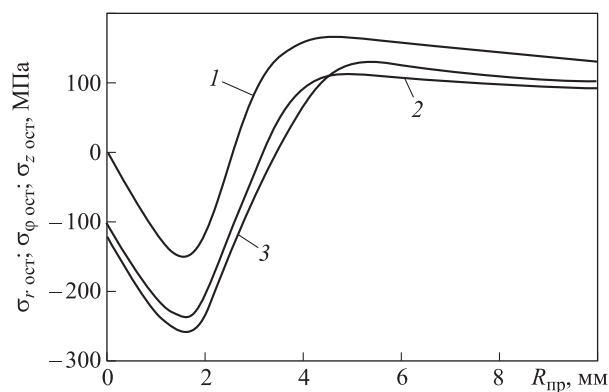


Рис. 3. Распределение радиального $\sigma_{r\text{ост}}$ (1), тангенциального $\sigma_{\phi\text{ост}}$ (2) и осевого $\sigma_{z\text{ост}}$ (3) остаточных напряжений по сечению цилиндрического образца

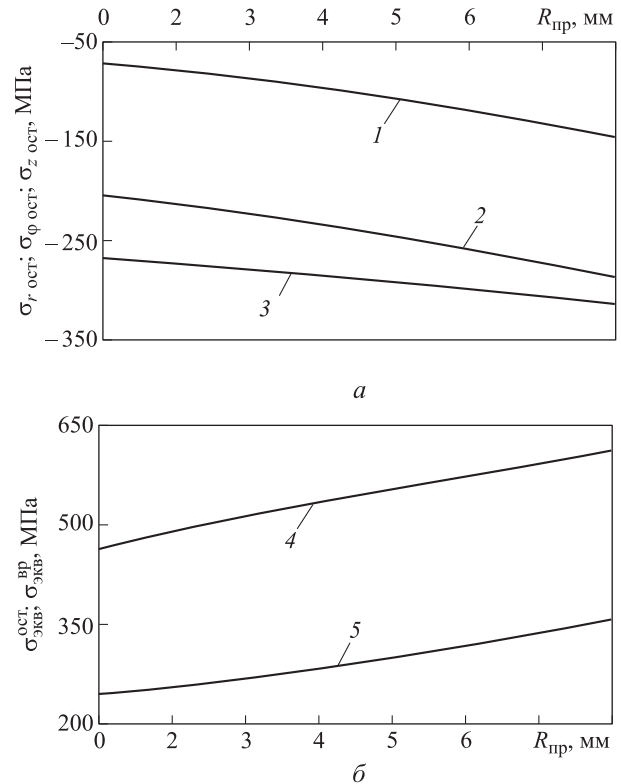


Рис. 4. Зависимости максимальных тангенциального $\sigma_{\phi\text{ост}}$ (1), радиального $\sigma_{r\text{ост}}$ (2) и осевого $\sigma_{z\text{ост}}$ (3) остаточных напряжений в поверхностном слое (а) и максимальных временного $\sigma_{\text{экв}}^{\text{вр}}$ (4) и остаточного $\sigma_{\text{экв}}^{\text{ост}}$ (5) эквивалентных напряжений (б) от профильного радиуса РИ $R_{пр}$

Результаты компьютерного моделирования показывали, что рост угла поворота РИ от 0 до -40° в направлении, противоположном ходу часовой стрелки, приводит к повышению остаточных эквивалентных напряжений на 34 %. Экспериментально установлено [1], что при увеличении угла поворота РИ от -45° до -85° остаточные напряжения будут резко возрастать, но при этих условиях начинает разрушаться поверхностный слой вследствие перенаклепа металла. На рис. 5 участки возможного разрушения поверхностного слоя отмечены штриховыми линиями.

При осциллирующем выглаживании инструментом с углом поворота $\alpha = -85^\circ$ получено максимальное временное эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв}}^{\text{вр}} = 745$ МПа (см. рис. 5, б). Результаты расчета подтверждают экспериментальные данные, которые показали, что при указанных режимах обработки происходит повреждение поверхностного слоя, так как эквивалентные напряжения достигают предела прочности материала. Увеличение угла поворота РИ по ходу

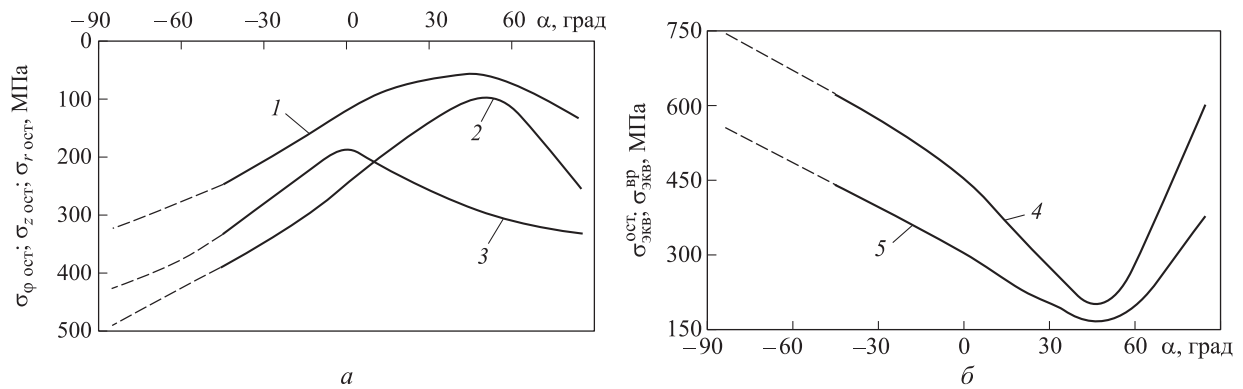


Рис. 5. Зависимости максимальных тангенциального $\sigma_{\phi \text{ ост}}$ (1), осевого $\sigma_{z \text{ ост}}$ (2) и радиального $\sigma_{r \text{ ост}}$ (3) остаточных напряжений в поверхностном слое и максимальных временного $\sigma_{\text{экв}}^{\text{вр}}$ (4) и остаточного $\sigma_{\text{экв}}^{\text{ост}}$ (5) эквивалентных напряжений (б) от угла поворота РИ α

часовой стрелки (от 0 до $+45^\circ$) влечет за собой уменьшение остаточных напряжений на 89 %, а рост угла α от $+45$ до $+85^\circ$ приводит к повышению напряжений на 110 %.

Результаты исследования достаточно хорошо согласуются с физическими закономерностями образования остаточных напряжений при упругопластическом деформировании. Чем больше пластическая деформация, тем значительнее остаточные напряжения сжатия. Для объяснения полученных данных рассмотрим форму пятна контакта РИ с цилиндрической заготовкой.

Форма пятна контакта. При отсутствии продольной подачи форму и площадь пятна контакта РИ с заготовкой определяли компьютерным моделированием в программе NX7.5. В ка-

честве исходных использовали следующие параметры: диаметр заготовки $d_3 = 20$ мм; $R_{\text{пр}} = 4$ мм; натяг $t = 0,1$ мм. При наличии продольной подачи РИ ($S = 0,11$ мм/об) и частоты вращения заготовки ($n_3 = 100$ мин $^{-1}$) форму пятна контакта также определяли компьютерным моделированием. На рис. 6 показаны формы пятна контакта РИ с заготовкой при изменении угла поворота РИ.

Форма пятна контакта РИ с заготовкой представляет собой правильную геометрическую фигуру (эллипс), которая искажается под действием упругопластической деформации металла. В табл. 1 приведены геометрические параметры — площадь A , ширина a и длина b — пятна контакта РИ с заготовкой при отсутствии продольной подачи.

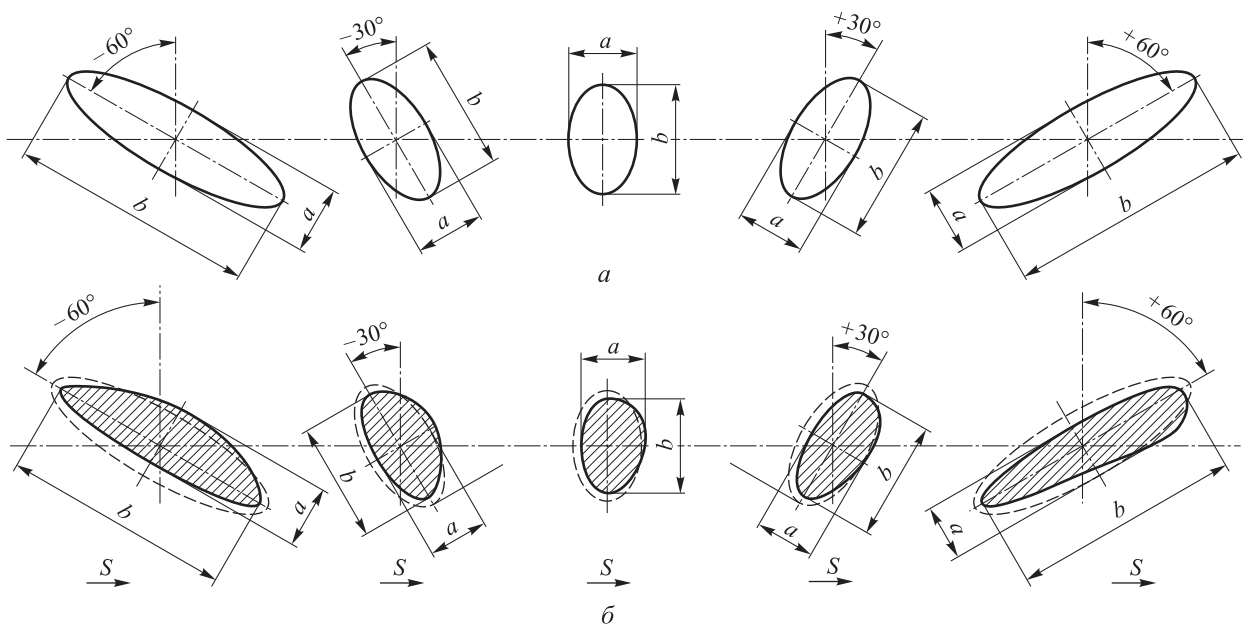


Рис. 6. Формы пятна контакта РИ с заготовкой при изменении угла наклона РИ в случае отсутствия (а) и наличия (б) продольной подачи S

Таблица 1

Геометрические параметры пятна контакта РИ с заготовкой при отсутствии продольной подачи

Параметр пятна	Угол поворота РИ α , град			
	0	± 30	± 60	± 85
A , мм ²	3,94	4,54	8,04	45,95
a , мм	1,78	1,67	1,57	1,53
b , мм	2,82	3,46	6,52	38,26

Расчетами установлено, что при отсутствии продольной подачи размеры пятна контакта не зависят от направления поворота РИ. С увеличением угла поворота α от 0 до $\pm 85^\circ$ ширина пятна контакта a снижается на 14 %, а его длина b и площадь A возрастают соответственно в 13,7 и 11,8 раза. Наиболее существенные изменения геометрических параметров происходят при углах поворота, близких к 90° .

В табл. 2 приведены геометрические параметры пятна контакта РИ с заготовкой при наличии продольной подачи и частоты вращения заготовки.

При наличии продольной подачи РИ и частоты вращения заготовки угол и направление поворота РИ оказывают влияние на размеры пятна контакта. При положительном направлении угла α ширина пятна контакта a уменьшается на 13 %, а его длина b и площадь A увеличиваются соответственно в 13,3 и 12 раз. При отрицательном направлении угла α параметр a снижается на 11 %, а b и A возрастают соответственно в 11,1 и 13,6 раза.

Результаты расчета напряжений, приведенные на рис. 5, можно объяснить следующим образом. При развороте РИ против хода часовой стрелки (см. рис. 1) большая ось эллипса пятна контакта расположена перпендикулярно направлению главного движения. При увеличении угла α растет площадь контакта и силы трения в зоне деформации, которые приводят к повышению касательных напряжений.

Таблица 2

Геометрические параметры пятна контакта РИ с заготовкой при наличии продольной подачи

Параметр пятна	Угол поворота РИ α , град						
	-85	-60	-30	0	+30	+60	+85
A , мм ²	32,21	5,60	3,10	2,37	2,70	4,79	27,54
a , мм	1,34	1,37	1,43	1,50	1,42	1,34	1,31
b , мм	30,62	5,21	2,77	2,02	2,42	4,55	26,78

Разворот РИ на угол $\alpha \geq 45^\circ$ приводит к росту напряжений, которые достигают предела прочности, и материал начинает шелушиться (разрушаться).

При повороте РИ по ходу часовой стрелки (см. рис. 1) с возрастанием угла α площадь пластического контакта увеличивается, но в направлении главного движения участвует не большая, а малая ось эллипса. При $\alpha = 0^\circ$ пластическая деформация происходит в неблагоприятных силовых условиях, поэтому напряжение в очаге деформации имеет относительно большое значение. При повороте инструмента по ходу часовой стрелки направление большой оси эллипса стремится к направлению главного движения и рабочие напряжения снижаются. При угле $\alpha = 45^\circ$ происходит пластический сдвиг материала и формируются минимальные напряжения. При $\alpha > 45^\circ$ снова создается неблагоприятная схема нагружения в очаге деформации и рабочие напряжения повышаются.

Глубина пластической зоны. Осциллирующее выглаживание сопровождается пластической деформацией поверхностных слоев материала. Глубина упрочненного слоя зависит от радиального давления в зоне контакта. С помощью программы ANSYS определена глубина упрочненного слоя. В качестве примера на рис. 7 показано поле распределения пластической деформации в РИ (1) и обрабатываемой заготовке (2).

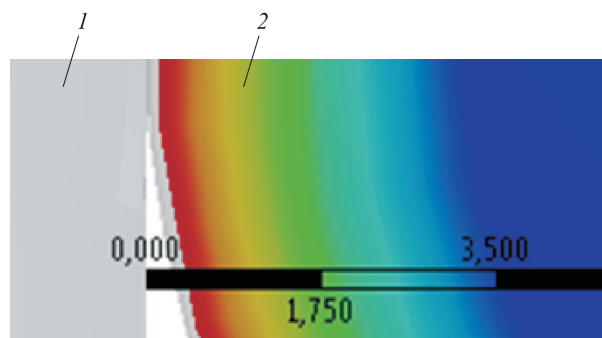


Рис. 7. Поле распределения пластической деформации в РИ (1) и обрабатываемой заготовке (2)

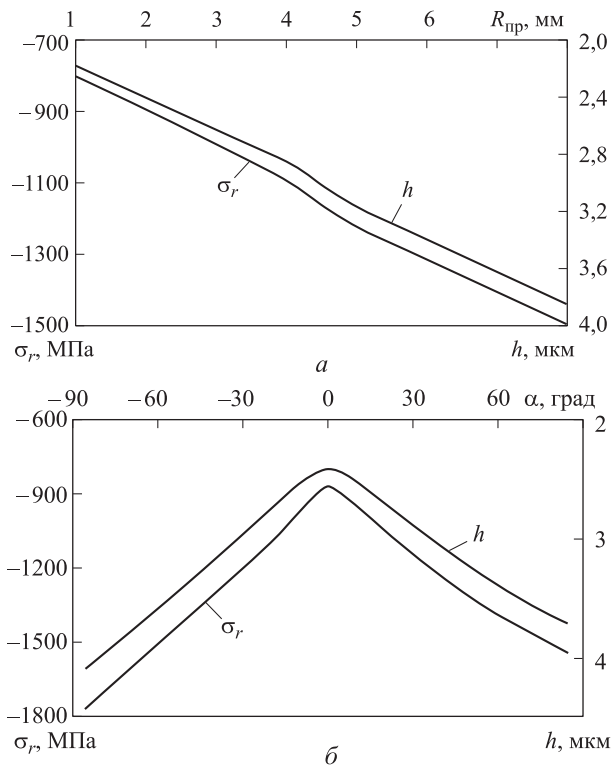


Рис. 8. Зависимости глубины пластической деформации h и радиального давления σ_r от профильного радиуса РИ $R_{пр}$ при $\alpha = 0^\circ$ (а) и от угла поворота РИ α (б)

ской деформации при упрочнении инструментом с радиусом профиля $R_{пр} = 5$ мм и углом поворота РИ $\alpha = 0^\circ$. При натяге $t = 0,1$ мм получена глубина упрочненного слоя $h = 2,75$ мм.

На рис. 8 приведены зависимости глубины пластической деформации и радиального дав-

ления от профильного радиуса и угла поворота РИ. При постоянном натяге с ростом профильного радиуса РИ увеличиваются радиальное давление в зоне контакта и глубина упрочненного слоя.

Полученные результаты согласуются с экспериментальными исследованиями [3, 7].

Максимальная глубина упрочненного слоя образуется при угле поворота РИ $\alpha = -85^\circ$ ($h = 4,15$ мм), а минимальная — при $\alpha = 0^\circ$ ($h = 2,42$ мм).

Выводы

1. На основе компьютерного моделирования разработана конечно-элементная модель осциллирующего выглаживания для определения напряженного состояния в очаге деформации и в упрочненной детали в зависимости от угла поворота и профильного радиуса РИ.

2. Увеличение профильного радиуса РИ от 1 до 8 мм приводит к повышению максимальных остаточных эквивалентных напряжений сжатия на 45 %.

3. При росте угла поворота РИ (от -30 до -85°) в направлении, противоположном ходу часовой стрелки, остаточные эквивалентные напряжения резко возрастают, а поверхностный слой подвергается разрушению.

4. Установлено, что глубина упрочненного слоя при разных значениях профильного радиуса РИ изменяется на 34 %, а при разных углах поворота РИ — на 70 %.

Литература

- [1] Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь. Влияние параметров осциллирующего выглаживания на шероховатость упрочненных поверхностей. *Вестник ИрГТУ*, 2017, № 4, с. 22–29.
- [2] Клепиков В.В., Бодров А.Н. *Технологические процессы алмазного выглаживания*. Москва, Высшая школа, 2004. 320 с.
- [3] Папшев Д.Д. *Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 1987. 152 с.
- [4] Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. *Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин*. Москва, Машиностроение-1, 2007. 400 с.
- [5] Емельянов В.И. *Правка деталей машин поверхностным пластическим деформированием*. Новгород, НовГУ, 1996. 127 с.
- [6] Суслов А.Г. *Качество поверхностного слоя деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2000. 320 с.
- [7] Попова В.В. *Поверхностное пластическое деформирование и физико-химическая обработка*. Рубцовск, Изд-во Рубцовского индустриального института, 2013. 98 с.
- [8] Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. *Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах*. Москва, Металлургия, 1989. 253 с.
- [9] Мрочек Ж.А., Макаревич С.С., Кожуро Л.М., Пашкевич М.Ф., Ильющенко А.Ф. *Остаточные напряжения*. Минск, Технопринт, 2003. 352 с.

- [10] Скороходов А.Н., Зудов Е.Г., Киричков А.А., Петренко Ю.П. *Остаточные напряжения в профилях и способы их снижения*. Москва, Metallurgia, 1985. 185 с.
- [11] Торбило В.М. Расчет оптимального усилия при алмазном выглаживании. *Станки и инструмент*, 1970, № 2, с. 25–26.
- [12] Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Расчетная модель остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя при размерном совмещенном обкатывании. *Вестник КузГТУ*, 2008, № 5, с. 50–58.
- [13] Зайдес С.А., Горбунов В.Ф., Горбунов А.В. Расчет профильного радиуса ролика при обкатке нежестких валов. *Вестник ИрГТУ*, 2015, № 3, с. 40–44.
- [14] Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь. Влияние кинематики локального нагружения на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации. *Вестник ИрГТУ*, 2017, № 6, с. 22–29.
- [15] Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Оценка напряженного состояния при стесненных условиях локального нагружения. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2016, № 10, с. 6–9.
- [16] Зайдес С.А., Климова Л.Г. Управление технологическими остаточными напряжениями в маложестких валах охватывающим деформированием. *Вестник ИрГТУ*, 2006, № 4, с. 46–51.
- [17] Зайдес С.А., Фам Дак Фьонг, Нгуен Ван Хинь. *Устройство для поверхностного пластического деформирования*. Пат. 2626522, РФ, 2017, бюл. № 22, 1 с.
- [18] Баков К.А. *ANSYS. Справочник пользователя*. Москва, ДМК Пресс, 2005. 640 с.
- [19] Бруняка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. *Инженерный анализ в Ansys Workbench. Ч. 1*. Самара, Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 271 с.
- [20] Chen X., Liu Y. *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press, 2014. 411 p.

References

- [1] Zaides S.A., Nguen Van Khin'. Vliianie parametrov ostsiliruiushchego vyglazhivaniia nashero khovost' uprochnennykh poverkhnostei [Oscillating burnishing parameters effect on hardened surface roughness]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2017, no. 4, pp. 22–29.
- [2] Klepikov V.V., Bodrov A.N. *Tekhnologicheskie protsessy almaznogo vyglazhivaniya* [Technological processes of diamond smoothing]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 2004. 320 p.
- [3] Papshev D.D. *Otdelochno-uprochniaiushchaia obrabotka poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Finishing and hardening treatment by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1987. 152 p.
- [4] Bliumenshtein V.Iu., Smelianskii V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniia na stadiakh obrabotki i ekspluatatsii detalei mashin* [Mechanics of technological inheritance at the stages of processing and operation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie-1 publ., 2007. 400 p.
- [5] Emel'ianov V.I. *Pravka detalei mashin poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Editing of machine parts by surface plastic deformation]. Novgorod, NovSU publ., 1996. 127 p.
- [6] Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloia detalei mashin* [The quality of surface layer of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2000. 320 p.
- [7] Popova V.V. *Poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie i fiziko-khimicheskaiia obrabotka* [Surface plastic deformation and physical and chemical treatment]. Rubtsovsk, Rubtsovskii industrial'nyi institute publ., 2013. 98 p.
- [8] Vishniakov I.A.D., Piskarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napriazheniiami v metallakh i splavakh* [Control of residual stresses in metals and alloys]. Moscow, Metallurgii publ., 1989. 253 p.
- [9] Mrochek Zh.A., Makarevich S.S., Kozhuro L.M., Pashkevich M.F., Il'yushchenko A.F. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stress]. Minsk, Tekhnoprint publ., 2003. 352 p.
- [10] Skorokhodov A.N., Zudov E.G., Kirichkov A.A., Petrenko Iu.P. *Ostatochnye napriazheniia v profiliakh i sposoby ikh snizheniia* [Residual stresses in profiles and ways to reduce them]. Moscow, Metallurgii publ., 1985. 185 p.
- [11] Torbilo V.M. Raschet optimal'nogo usiliya pri almaznom vyglazhivanii [The calculation of the optimal effort when the diamond pressing]. *Stanki i instrument* [Machines and tools]. 1970, no. 2, pp. 25–26.

- [12] Bliumenshtein V.Iu., Makhlov M.S. Raschetnaia model' ostatochnykh napriazhenii uprochnennogo poverkhnostnogo sloia pri razmernom sovmeshchennom obkatyvanii [Calculation model of the residual stresses of the hardened surface layer with dimensional combined run-in]. *Vestnik KuzGTU* [Vestnik of the KuzSTU]. 2008, no 5, pp. 50–58.
- [13] Zaides S.A., Gorbunov V.F., Gorbunov A.V. Raschet profil'nogo radiusa rolka pri obkatke nezhestkikh valov [Calculation of roller profile radius under non-rigid shaft rolling]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 40–44.
- [14] Zaides S.A., Nguen Van Khin'. Vliianie kinematiki lokal'nogo nagruzheniia na napriazhenno-deformirovannoe sostoianie v ochage deformatsii [Local loading kinematics effect on stress-strain state in deformation zone]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2017, no. 6, pp. 22–29.
- [15] Zaides S.A., Ngo Kao Kyong. Otsenka napriazhennogo sostoianii pristesnennykh usloviakh lokal'nogo nagruzheniia [Evaluation of stress state in cramped conditions of local loading]. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia* [Strengthening Technologies and Coatings]. 2016, no. 10, pp. 6–9.
- [16] Zaides S.A., Klimova L.G. Upravlenie tekhnologicheskimi ostatochnymi napriazheniiami v malozhestkikh valakh okhvatyvaiushchim deformirovaniem [Control of technological residual stresses in low-rigid shafts by covering deformation]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2006, no. 4, pp. 46–51.
- [17] Zaides S.A., Nguen Van Khin', Fam Dak Fyong. *Ustroistvo dlia poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia* [Device for surface plastic deformation]. Patent RF no. 2626522, 2017. 1 p.
- [18] Bakov K.A. ANSYS. *Spravochnik pol'zovatel'ia* [ANSYS. User manual]. Moscow, DMK Press, 2005. 640 p.
- [19] Bruiaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeianov I.E. *Inzhenernyi analiz v ANSYS Workbench. Ch. 1* [Engineering analysis in Ansys Workbench. Pt. 1]. Samara, SSTU publ., 2010. 271 p.
- [20] Chen Xiaolin, Liu Yijun. *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press, 2014. 411 p.

Статья поступила в редакцию 19.04.2018

Информация об авторах

ЗАЙДЕС Семен Азикович (Иркутск) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Машиностроительные технологии и материалы». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

НГУЕН Ван Хинь (Иркутск) — аспирант кафедры «Машиностроительные технологии и материалы». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: nguyenvanhinhck@gmail.com).

Information about the authors

ZAYDES Semen Azikovich (Irkutsk) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Mechanical Engineering Technologies and Materials. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: zsa@istu.edu).

NGUYEN Van Hinh (Irkutsk) — Postgraduate, Mechanical Engineering Technologies and Materials Department. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: nguyenvanhinhck@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь. Влияние направления и геометрии рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние при осциллирующем выглаживании цилиндрических деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 8, с. 28–36, doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-28-36.

Please cite this article in English as:

Zaides S.A., Nguen Van Hinh. The Influence of the Direction and Geometry of the Working Tool on the Stress-Strain State of Cylindrical Parts in Oscillating Burnishing Proceedings of Higher Educational Institutions. *Machine Building*, 2018, no. 8, pp. 28–36, doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-28-36.