

УДК 621.7.011

DOI 10.18698/0536-1044-2017-5-52-59

Повышение напряженного состояния в очаге деформации при поверхностном пластическом деформировании цилиндрических деталей

С.А. Зайдес, Нго Као Кьонг

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

Increasing the Stress State in the Deformation Zone for Cylindrical Parts under Surface Plastic Deformation

S.A. Zaides, Ngo Cao Cuong

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

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

i Представлена новая кинематика обкатных роликов, обеспечивающая поверхностное пластическое деформирование валов малой жесткости. На основе теории малых упругопластических деформаций и метода конечных элементов построены математические модели процесса упрочнения, позволяющие определять напряженное состояние образцов в зависимости от формы и кинематики индентора. Рассмотрено влияние четырех схем деформирования — обкатывания качением, скольжением, одним и двумя роликами с вращением относительно диаметральной оси — на напряженное состояние. Выявлено, что основными факторами, влияющими на напряженно-деформированное состояние деталей, являются геометрия, форма, взаимное расположение элементов деформирующего инструмента и их кинематика относительно обрабатываемой детали.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, интенсификация деформационного процесса, напряженное состояние, поверхностное пластическое деформирование, деформационное упрочнение, двухрадиусный ролик.

i This paper presents the new kinematics of reeling rollers that provide surface plastic deformation of low rigidity rollers. Mathematical models of the hardening process are built based on the small elastic deformation theory and the finite element method. The models are used to determine the stress state depending on the shape and the kinematics of the indenter. The effect of four different schemes of deformation on the stress state is considered, that are skiving, roller burnishing, burnishing by one or two rollers that rotate about a diametrical axis. It is established that the geometry, shape, kinematics and relative position of the elements of the deforming tool are the main factors that influence the stress-strain state of the parts.

Keywords: finite element modeling, intensification of deformation process, stress state, surface plastic deformation, strain hardening, two-radius roller.

В технологических процессах изготовления деталей машин поверхностное пластическое деформирование (ППД) применяют преимущественно для повышения качества и прочности поверхностного слоя. После упрочняющей обработки возрастает их износостойкость, стойкость к коррозионным воздействиям, усталостная прочность, герметичность и др. Во многих случаях использование ППД позволяет увеличить запасы прочности изделий, работающих при переменных нагрузках, в 1,5–3 раза, а срок их службы — в десятки раз [1–4].

Известные процессы ППД базируются чаще всего на использовании локальных методов упрочнения. Однако основанные на них технологии не всегда удается эффективно применить. Так, при ППД деталей малой жесткости (тонкостенных, длинномерных) возможности локальных методов упрочнения ограничены. Это связано с малой изгибной жесткостью заготовки, вибрациями в механической системе, сложностью достижения заданного качества изделия, точности и производительности обработки, а также с отсутствием необходимого технологического оборудования. Пластическое деформирование поверхностного слоя вызывает значительные деформации и перемещения частиц металла, что отрицательно сказывается на геометрической форме деталей [5]. Таким образом, для повышения качества поверхностного слоя мало жестких цилиндрических изделий необходимо достаточно большое давление в зоне рабочего контакта, которое обычно вызывает их искривление. При снижении деформирующего усилия не удается получить требуемые значения параметров качества упрочненного слоя.

С учетом вышеизложенного возникает вопрос о необходимости интенсификации напряженно-деформированного состояния в очаге деформации технологических способов ППД для достижения высоких качественных показателей при обработке мало жестких деталей.

Цель работы — разработка новых технологических схем ППД, обеспечивающих интенсификацию напряженного состояния в очаге упругопластической деформации при локальном деформирующем воздействии.

Физический подход к решению проблемы. Согласно современной дислокационной теории, основные механизмы упрочнения, позволяющие повысить напряжение пластического

течения, удобно классифицировать на основании геометрических размеров «препятствий» (элементов субструктуры, границ зерен, растворенных атомов, дислокаций, дисперсных частиц), тормозящих движение дислокаций [6].

Наиболее эффективное упрочнение сталей и сплавов можно реализовать путем целенаправленных технологических воздействий на структуру металлов для увеличения плотности дислокаций и создания дислокационной субструктуры в целях повышения сопротивления сдвигу.

Деформационное упрочнение при ППД возникает вследствие роста числа дефектов кристаллического строения, затруднения движения дислокаций, когда исчерпываются возможности скольжения (двойникования) в данных плоскостях. При этом увеличиваются их плотность и кривизна дислокаций, образуются точечные дефекты и барьеры типа барьера Ломера–Коттрелла, фрагменты и пересечения плоскостей скольжения, ступеньки на дислокациях, узлы и другие сложные дислокационные построения [7, 8]. Следовательно, постепенно возрастающая искаженность решетки повышает сопротивление деформации и уменьшает пластичность. Наибольшее значение имеет увеличение плотности дислокаций, так как возникающее между ними взаимодействие тормозит их дальнейшее перемещение.

Таким образом, способы повышения прочностных свойств сплавов и сталей заключаются в разработке упрочняющих технологий, обеспечивающих формирование такого структурного состояния материала, при котором максимально реализуются основные принципы дислокационной теории упрочнения. Интенсификации напряженного состояния можно достигнуть усилением деформационного искажения зерен материала. Отсюда вытекает технологическая задача: необходимо создать конструкцию и кинематику рабочего инструмента, которые бы при ППД усиливали искажение структуры материала при сохранении качества поверхности.

Схемы ППД. При ППД широко применяют упрочняющую обработку по схемам качения рабочего инструмента (рис. 1, а) и скольжения (рис. 1, б). Вторую схему значительно реже используют на практике, так как трение скольжения в зоне контакта приводит к большим тепловым процессам, а инструмент интенсивно

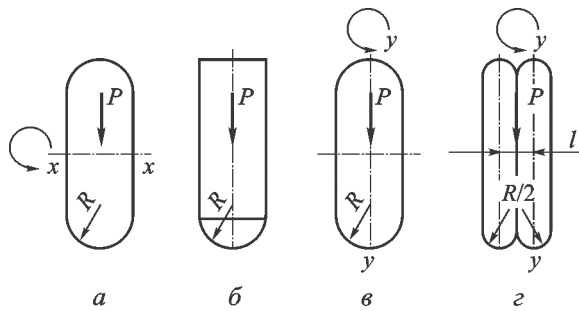


Рис. 1. Схемы нагружения цилиндрической поверхности образца жестким роликом при различных условиях контакта с обрабатываемой поверхностью ($x-x$, $y-y$ — оси вращения; P — усилие деформирования)

изнашивается. Однако если оценить эти схемы упрочнения с точки зрения механики процесса и возможности деформационного искажения микроструктуры, то обработка скольжением представляется более эффективной.

Техническая идея интенсификации напряженного состояния в очаге деформации заключается в изменении кинематики рабочего инструмента, которая будет усиливать искажение зеренной структуры материала. Предлагается вращать деформирующий ролик относительно вертикальной (рис. 1, в), а не горизонтальной оси. В этом случае пластический отпечаток от ролика на поверхности детали, представляющий собой фигуру в виде эллипса, постоянно изменяет ориентацию большой и малой осей. При вращении ролика вокруг вертикальной оси $y-y$ происходит наложение пластических полей разных по направлению ориентаций, что должно способствовать «перемешиванию» структуры в поверхностном слое.

Если совместить два ролика и вращать их также относительно оси $y-y$ (рис. 1, г), то эффективность обработки должна быть еще выше, так как при каждом обороте ролика в процессе деформирования участвуют не два, а четыре очага деформации.

Конечно-элементное моделирование процесса. Для анализа напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочнении различными способами ППД и для исследования формирования временных и остаточных напряжений успешно применяют компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов. Одной из универсальных и широко используемых программ, реализующих этот метод, является про-

грамма ANSYS, которая и была использована в данной работе.

Моделирование упрочняющей обработки и процессов, протекающих в поверхностном слое деталей при ППД, осложнено рядом факторов, не учитываемых в аналитических расчетах и при моделировании технологических остаточных деформаций в статике. Фактор времени является наиболее значимым. Формирование поверхностного слоя, упрочненного ППД, в отличие от статического моделирования, осуществляется с помощью моделирования реального воздействия деформирующих элементов на материал модели. Динамическое моделирование упрочняющей обработки позволяет исследовать эффект упрочнения и выполнить полный цикл определения временных и остаточных напряжений, а также остаточных деформаций [9].

Формирование геометрии расчетной области в программе проводили последовательно согласно схемам нагружения цилиндрической поверхности образца жестким роликом (см. рис. 1). Упрочняющая обработка в программе представляет собой реальное перемещение инденторов во времени относительно образца. Траектория движения упрочняющих тел воспроизводит режим работы упрочняемой детали. Приняты следующие режимы обработки: глубина внедрения рабочего инструмента $t = 0,1$ мм; частота вращения инструмента $n_1 = 600$ мин⁻¹ и образца $n_2 = 100$ мин⁻¹; подача инструмента $s = 0,2$ мм/об; коэффициент трения в зоне контакта $f = 0,2$.

Характеристики образца: форма поверхности — цилиндрическая диаметром 25 мм; материал — сталь 45 — упругопластический, упрочняющийся; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала — билинейная, описываемая пределом текучести $\sigma_T = 360$ МПа и модулем упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа.

Характеристики индентора: тип — ролик с приведенным радиусом $R = 5$ мм; материал — твердый сплав ВК8; модуль упругости $E = 6 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Общая концепция моделирования закономерностей ППД позволяет предложить перспективное направление синтеза методов и схем упрочнения, обеспечивающее формирование новых комплексов свойств поверхности и поверхностного слоя деталей комбинированием истории нагружения на каждом этапе упруго-пластического деформирования.

Техническим результатом данного исследования является расширение возможностей обработки ППД и диапазона достижимых параметров механического состояния металла поверхностного слоя благодаря применению деформирующего ролика со специальной формой профиля рабочей поверхности и благодаря его кинематике относительно обрабатываемой поверхности.

Результаты моделирования. Напряженное состояние материала при деформационном упрочнении можно условно разделить на временное и остаточное. Первое из них возникает при действии внешних сил, второе — при их отсутствии. Временное напряжение влияет на энергосиловые характеристики процесса, степень и глубину упрочненного слоя, давление в зоне контакта, шероховатость поверхности заготовки, прочность и стойкость деформирующего инструмента, а остаточные напряжения — на усталостную прочность, процесс разрушения, износостойкость, коррозию и другие эксплуатационные свойства изделий [10, 11].

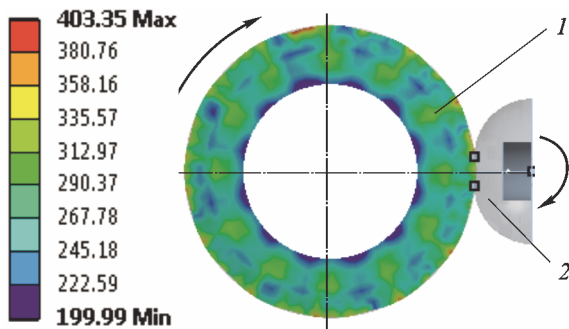


Рис. 2. Распределение остаточных эквивалентных напряжений, МПа, в поперечном сечении образца (см. рис. 1, з):
1 — деталь; 2 — инструмент

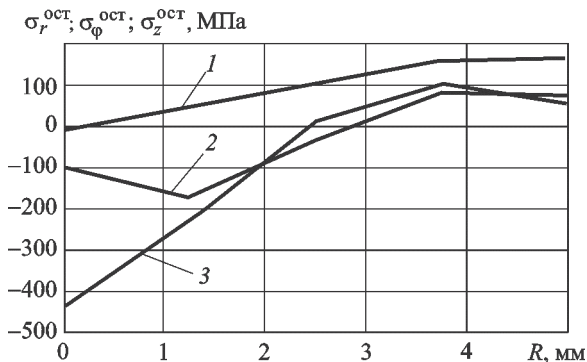


Рис. 3. Распределение компонент $\sigma_r^{\text{ост}}$ (1), $\sigma_\phi^{\text{ост}}$ (2), $\sigma_z^{\text{ост}}$ (3) остаточных напряжений вдоль радиуса R образца (см. рис. 1, з)

Эквивалентное напряжение по Мизесу при использовании главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 вычисляется по формуле [5]

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

На рис. 2 и 3 приведены примеры распределения остаточных эквивалентных напряжений в поперечном сечении образца и компонент напряжений вдоль его радиуса при следующих режимных параметрах: глубина внедрения $t = 0,1$ мм, подача $s = 0,2$ мм/об, частота вращения образца $n_2 = 100$ мин⁻¹ и инструмента $n_1 = 600$ мин⁻¹.

На рис. 4 показано влияние различных схем деформирования (обкатывания) на максимальное эквивалентное остаточное напряжение, а в таблице приведены значения компонентов максимальных временных и остаточных напряжений. При ППД качением (см. рис. 1, а) происходит минимальное искажение структуры. В случае ППД скольжением (см. рис. 1, б) возникает большое трение, которое приводит к повышению интенсивности напряжения в зоне деформации. При ППД с вращением одного ролика относительно диаметральной оси $y-y$ (см. рис. 1, в) деформации напряжения усиливаются вследствие разных положений очага. Наиболее эффективный результат получен при ППД с вращением двух роликов относительно оси $y-y$ (см. рис. 1, з). В результате применения конструкции профиля рабочей части двухрадиусного обкатного ролика металл поверхностного слоя детали при обработке находится в условиях сложного напряженного состояния и испытывает пластическую деформацию с накоплением большого числа искажений.

Важным элементом механики процесса деформирования и структурообразования яв-

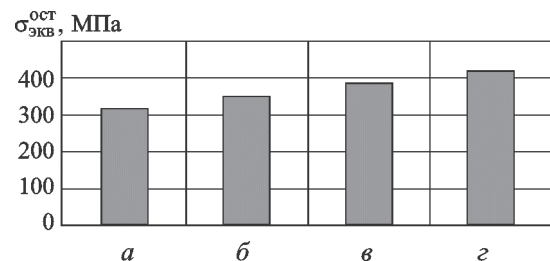


Рис. 4. Зависимость максимального эквивалентного остаточного напряжения $\sigma_{\text{экв}}^{\text{ост}}$ от схемы обкатывания (см. рис. 1):

а — с вращением ролика относительно оси $x-x$;
б — без вращения ролика; в — с вращением одного ролика относительно оси $y-y$; з — с вращением двух роликов относительно оси $y-y$

**Значения компонент максимальных временных и остаточных напряжений
для различных схем обкатывания, МПа**

Схема обкатывания	$\sigma_{\phi}^{вр}$	$\sigma_r^{вр}$	$\sigma_z^{вр}$	$\sigma_{\phi}^{ост}$	$\sigma_r^{ост}$	$\sigma_z^{ост}$
С вращением ролика относительно оси $x-x$	-970	-730	-799	-189	-35	-288
Без вращения ролика	-1 128	-750	-815	-206	-79	-312
С вращением одного ролика относительно оси $y-y$	-1 135	-810	-870	-241	-90	-317
С вращением двух роликов относительно оси $y-y$	-1 181	-868	-914	-262	-115	-322

ляется расстояние между очагами пластических отпечатков, которое должно быть оптимальным для обеспечения интенсификации деформационного процесса. Первый деформирующий элемент полностью работает в зоне очага деформации, создаваемой вторым аналогичным элементом. Происходит перекрытие и «перемешивание» двух очагов и их слияние в один комплексный очага деформации. Существует оптимальное расстояние между вершинами роликов (в данном случае $l = 1,2...1,6$ мм), при котором обеспечивается формирование максимальных напряжений в очаге деформации

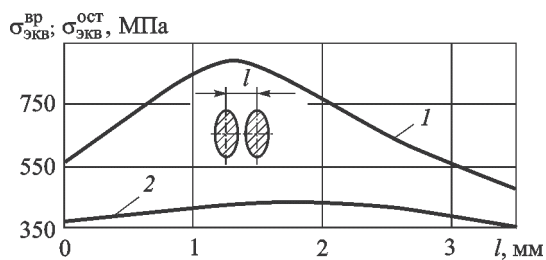
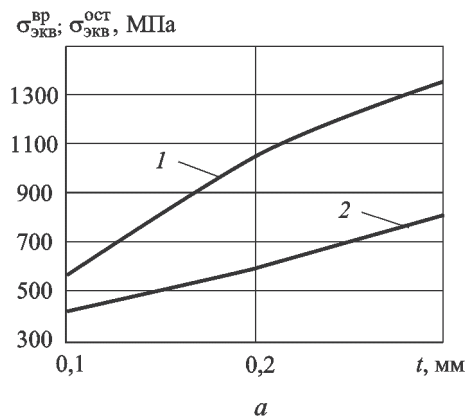


Рис. 5. Влияние расстояния l между пластическими отпечатками на максимальные эквивалентные временные $\sigma_{\text{экв}}^{вр}$ (1) и остаточные $\sigma_{\text{экв}}^{ост}$ (2) напряжения образца ($n_1 = 1\,200$ мин⁻¹, $n_2 = 100$ мин⁻¹, $t = 0,1$ мм, $s = 0,2$ мм/об)

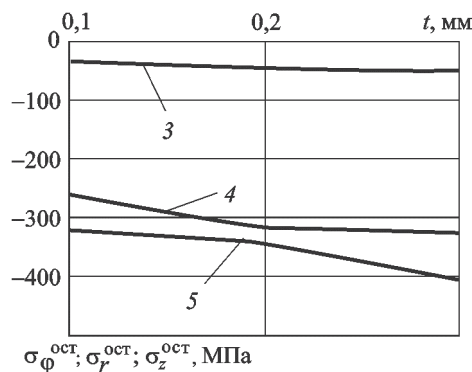


а

(рис. 5). При $l > 3$ мм очаги деформации не влияют друг на друга и можно считать, что двухрадиусный ролик работает почти как обычный.

На рис. 6 показано влияние глубины внедрения двухрадиусного ролика на максимальные эквивалентные напряжения и компоненты максимального остаточного напряжения образца. Увеличение этой глубины приводит к повышению степени деформации и плотности дислокаций, а следовательно, и напряжений $\sigma_{\text{экв}}^{вр}$.

На рис. 7 представлено влияние подачи двухрадиусного ролика на максимальные эквивалентные напряжения и компоненты максимальных остаточных напряжений. Уменьшение подачи приводит к местному увеличению деформации обкатываемой поверхности. Подача инструмента при используемых режимах обработки (в данном случае $s = 0,1...0,2$ мм/об) практически не влияет на уровень остаточных напряжений. При постоянной глубине внедрения деформирующего инструмента изменение подачи почти не оказывает влияния на временные напряжения (см. рис. 7, а). Возрастание же подачи до большего значения ($s = 0,4...0,6$ мм/об) приводит к снижению оста-



б

Рис. 6. Влияние глубины t внедрения двухрадиусного ролика на максимальные эквивалентные временные $\sigma_{\text{экв}}^{вр}$ (1) и остаточные $\sigma_{\text{экв}}^{ост}$ (2) напряжения (а) и компоненты $\sigma_{\phi}^{ост}$ (3), $\sigma_r^{ост}$ (4), $\sigma_z^{ост}$ (5) максимальных остаточных напряжений (б) образца ($n_1 = 1\,200$ мин⁻¹, $n_2 = 100$ мин⁻¹, $s = 0,2$ мм/об)

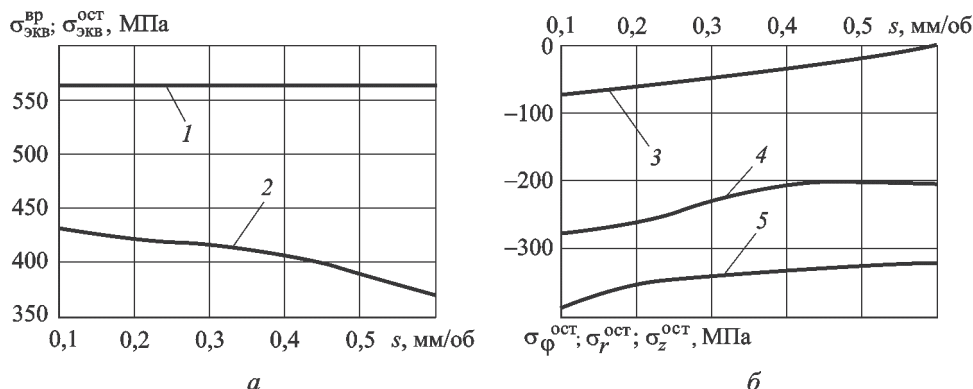


Рис. 7. Влияние подачи s двухрадиусного ролика на максимальные эквивалентные временные $\sigma_{\text{экв}}^{\text{вр}}$ (1) и остаточные $\sigma_{\text{экв}}^{\text{ост}}$ (2) напряжения (а) и компоненты $\sigma_{\varphi}^{\text{ост}}$ (3), $\sigma_r^{\text{ост}}$ (4), $\sigma_z^{\text{ост}}$ (5) максимальных остаточных напряжений (б) образца ($n_1 = 1\,200 \text{ мин}^{-1}$, $n_2 = 100 \text{ мин}^{-1}$, $t = 0,1 \text{ мм}$)

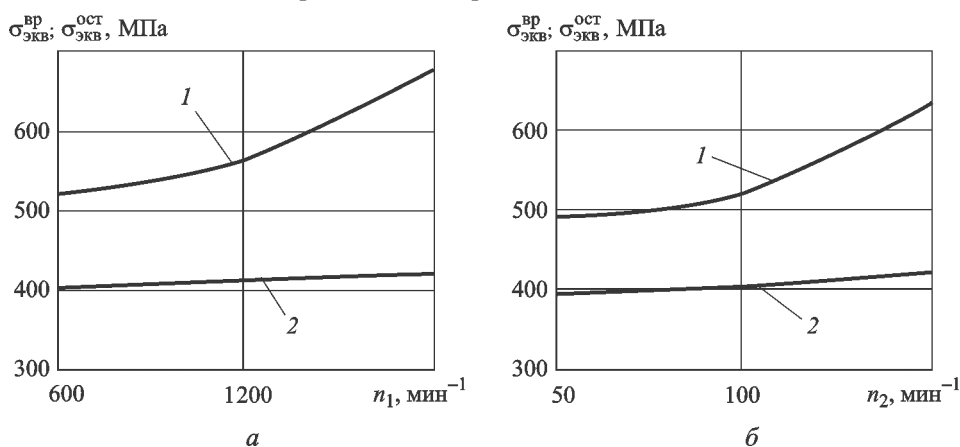


Рис. 8. Влияние частоты вращения двухрадиусного ролика n_1 (а) и детали n_2 (б) на максимальные временные $\sigma_{\text{экв}}^{\text{вр}}$ (1) и остаточные $\sigma_{\text{экв}}^{\text{ост}}$ (2) эквивалентные напряжения образца ($t = 0,1 \text{ мм}$, $s = 0,2 \text{ мм/об}$): а — $n_2 = 100 \text{ мин}^{-1}$; б — $n_1 = 600 \text{ мин}^{-1}$

точных напряжений вследствие неравномерного перекрытия очагов пластической деформации.

На рис. 8 показано влияние частоты вращения двухрадиусного ролика на максимальные остаточные напряжения образца при разных частотах его вращения. Повышение скорости деформации приводит к увеличению сопротивления металлов деформированию, что объясняется резким возрастанием скорости перемещения дислокаций, вызывающим, в свою очередь, увеличение сопротивления кристаллической решетки этому перемещению.

Проведенные исследования показали, что разработанная конструкция профиля рабочей части обкатного ролика и новая кинематика его движения позволяют накапливать большие значения деформаций и увеличивать значения параметров механического состояния металла поверхностного слоя при обработке ППД по сравнению с традиционными способами локального упрочнения.

Выводы

1. Условие контакта и характер взаимодействия деформирующего инструмента с деталью в процессе обработки оказывают существенное влияние на перераспределение материала поверхностного слоя. Выявлено, что основными факторами, влияющими на напряженно-деформированное состояние деталей, являются геометрия, форма, взаимное расположение элементов деформирующего инструмента и их кинематика относительно обрабатываемой детали.

2. Исследования показали, что предложенная конструкция профиля рабочей части обкатного ролика позволяет увеличить значения эквивалентных остаточных напряжений в 1,2–1,4 раза. Установлены расстояние между центрами пластических отпечатков, глубина внедрения, подача и частота вращения детали и рабочего инструмента, при которых возникают максимальные эквивалентные временные и остаточные напряжения.

Литература

- [1] Одинцов Л.Г. *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 1987. 328 с.
- [2] Смелянский В.М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2002. 300 с.
- [3] Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. *Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2007. 399 с.
- [4] Зайдес С.А., Емельянов В.Н., Попов М.Е. *Деформирующая обработка валов*. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2013. 452 с.
- [5] Зайдес С.А., Исаев А.Н. *Технологическая механика осесимметричного деформирования*. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2007. 432 с.
- [6] Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. *Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий*. Москва, Машиностроение, 2003. 384 с.
- [7] Полухин П.И. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов*. Москва, Металлургия, 1983. 352 с.
- [8] Тушинский Л.И. *Теория и технология упрочнения металлических сплавов*. Новосибирск, Наука, 1990. 306 с.
- [9] Букатый А.С. Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2014, т. 16, № 6(2), с. 374–377.
- [10] Поляк М.С. *Технология упрочнения*. В 2 т. Т. 2. Москва, Машиностроение, 1995. 688 с.
- [11] Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Оценка напряженного состояния при стесненных условиях локального нагружения. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2016, № 10, с. 6–9.

References

- [1] Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Hardening and finishing details by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1987. 328 p.
- [2] Smelianskii V.M. *Mekhanika uprochneniia detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics hardening of parts surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2002. 300 p.
- [3] Bliumenshtein V.Iu., Smelianskii V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniia na stadiakh obrabotki i ekspluatatsii detalei mashin* [Mechanics of technological inheritance on the stages of processing and exploitation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2007. 399 p.
- [4] Zaides S.A., Emel'ianov V.N., Popov M.E. *Deformiruiushchaia obrabotka valov* [Deforming shaft machining]. Irkutsk, IrSTU publ., 2013. 452 p.
- [5] Zaides S.A., Isaev A.N. *Tekhnologicheskaiia mekhanika osesimmetrichnogo deformirovaniia* [Technological mechanics of axisymmetric deformation]. Irkutsk, IrSTU publ., 2007. 432 p.
- [6] Prikhod'ko V.M., Petrova L.G., Chudina O.V. *Metallofizicheskie osnovy razrabotki uprochniiaushchikh tekhnologii* [Metal-physical basis for the development of hardening technologies]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2003. 384 p.
- [7] Polukhin P.I. *Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii metallov i splavov* [The resistance to plastic deformation of metals and alloys]. Moscow, Metallurgii publ., 1983. 352 p.
- [8] Tushinskiy L.I. *Teoriya i tekhnologiya uprochneniya metallicheskih splavov* [Theory and technology of hardening of metallic alloys]. Novosibirsk, Nauka publ., 1990. 306 p.
- [9] Bukatyi A.S. Povyshenie tochnosti izgotovleniia otvetstvennykh detalei dvigatelei sredstvami staticheskogo i dinamicheskogo modelirovaniia [Improving the accuracy of manufacturing the engines critical parts by means of static and dynamic modeling]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2014, vol. 16, no. 6(2), pp. 374–377.

- [10] Poliak M.S. *Tekhnologiia uprochneniia* [The technology of hardening]. In 2 vol. Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie publ., 1995. 688 p.
- [11] Zaides S.A., Ngo Kao Kyong. Otsenka napriazhennogo sostoianiia pri stesnennykh usloviakh lokal'nogo nagruzheniia [Evaluation of stress state in cramped conditions of local loading]. *Uprochniiaushchie tekhnologii i pokrytiia* [Strengthening Technologies and Coatings]. 2016, no. 10, pp. 6–9.

Статья поступила в редакцию 06.02.2017

Информация об авторах

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

НГО Као Кыонг (Иркутск) — аспирант кафедры машиностроительных технологий и материалов. Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: cuong.istu@gmail.com).

Information about the authors

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

NGO Cao Cuong (Irkutsk) — Postgraduate, Mechanical Engineering Technologies and Materials Department. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: cuong.istu@gmail.com).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
В.Г. Цегельского
«Струйные аппараты»

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований двухфазных струйных аппаратов и газовых эжекторов с звуковыми и сверхзвуковыми соплами. Предложена общая теория, опирающаяся на термодинамику необратимых процессов и объясняющая с единых позиций протекающие в них процессы. Рассмотрены физические особенности течения как двухфазных, так и газовых сред в проточной части аппарата. Сформулирована аксиома о стремлении к совершенству процессов в природе, определяющая с позиции термодинамики необратимых процессов реализацию одного из нескольких возможных режимов работы как в однофазных газовых, так и двухфазных струйных аппаратах. Приведены методики расчета двухфазных струйных аппаратов эжекторного и инжекторного типов и газовых эжекторов с цилиндрическими и коническими камерами смешения. Показаны перспективы использования этих аппаратов в нефтегазодобывающей, нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности, в энергетике, космической и глубоководной технике.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru