

УДК 621.787.4

doi: 10.18698/0536-1044-2021-2-9-17

Влияние параметров рабочего инструмента на пластический отпечаток при орбитальном выглаживании цилиндрических деталей

С.А. Зайдес, Ван Ань Фам, Л.Г. Климова

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Impact of Working Tool Parameters upon Plastic Imprint During Orbital Burnishing of Cylindrical Parts

S.A. Zaides, Van Anh Pham, L.G. Klimova

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research Technical University

Приведены результаты моделирования процесса отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических деталей орбитальным выглаживанием. С помощью программы SolidWorks разработана конечно-элементная модель орбитального выглаживания, позволяющая определять некоторые геометрические характеристики пластического пятна контакта и пластической лунки в зависимости от параметров рабочего инструмента. Анализ полученных результатов показал, что при орбитальном выглаживании угол наклона рабочего инструмента и радиус орбитального вращения оказывают большее влияние на геометрические размеры и площадь пластической лунки, чем радиус рабочего инструмента и диаметр детали. При увеличении угла наклона рабочего инструмента с 0 до 60°, его радиуса с 3 до 11 мм, радиуса орбитального вращения с 2 до 6 мм длина лунки возрастает в 1,3–3,6 раза, ширина — в 1,1–3,0 раза, а площадь лунки — в 3,7–10,3 раза.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, орбитальное выглаживание, пятно контакта, пластический отпечаток, пластическая лунка, рабочий инструмент

The paper presents the results of research in modeling the process of finishing and hardening processing of cylindrical parts by orbital burnishing. With the help of the SolidWorks software, a finite element model of orbital burnishing has been developed, which makes it possible to determine some geometric characteristics of a plastic impression and a plastic hole during orbital burnishing depending on the parameters of the working tool. The results obtained show that the most significant influence on the size and area of the plastic hole during orbital burnishing is exerted by the angle of inclination of the working tool, the radius of orbital rotation, less significant — the radius of the working tool. With an increase in the angle of inclination of the working tool from 0 to 60°, the radius of the working tool from 3 to 11 mm, the radius of orbital rotation from 2 to 6 mm, the length of the hole increases by 1,3–3,6 times, the width — by 1,1–3,0 times, and the area of the hole is 3,7–10,3 times.

Keywords: finite element modeling, orbital smoothing, contact patch, plastic imprint, hole, working tool

Среди отделочно-упрочняющих методов обработки достаточно широкое распространение получили способы, основанные на поверхностном пластическом деформировании (ППД) де-

талей машин [1–4]. Использование малых пластических деформаций позволяет не только получить более высокие механические свойства металла, но и значительно повысить качество

поверхностного слоя. При ППД существенно снижается шероховатость поверхности, а в поверхностных слоях после обработки формируются остаточные напряжения сжатия [5, 6].

В настоящее время существует достаточно много разнообразных способов воздействия рабочего инструмента (РИ) на поверхностный слой деталей машин. Их можно подразделить на статические, динамические, ударные, ультразвуковые, магнитные и др. [2, 7–10]. Каждый вид воздействия на изделие оставляет пластический отпечаток, при перемещении которого образуется след от обработки. Наложение следов позволяет полностью упрочнить обрабатываемую поверхность детали.

На смену традиционным методам деформационного упрочнения [1, 11] приходят другие, основанные на использовании более сложной кинематики РИ [7, 12–14]. Так, в Иркутском национальном исследовательском техническом университете разработаны способы ППД, построенные на новой кинематике рабочего инструмента (центробежное движение, осциллирующее выглаживание, обработка гладкими плитами и др.) [15, 16].

При изготовлении нежестких деталей типа валов и осей возникает особая проблема. В случае обработки ППД значительное силовое воздействие вызывает изгиб заготовки, а при малом воздействии не удается получить заданные свойства поверхностного слоя. Повысить интенсивность напряжений в зоне упругопластической деформации можно путем создания более сложной кинематики РИ [16].

Рассмотрим процесс ППД, основанный на орбитальном движении РИ [17]. Для оценки

качества обработки исследуем характерные формы пластического отпечатка РИ с обрабатываемой поверхностью.

Цель работы — разработка модельных представлений о формировании пластического отпечатка при орбитальном выглаживании в зависимости от технологической схемы и геометрии РИ.

Методика исследования. Анализ пластического отпечатка. Если РИ имеет сложную форму [5, 7] или совершает соответствующее движение, например, орбитальное [17], то пластическая лунка (ПЛ) формируется в результате сложного воздействия РИ на материал детали. В этом случае ПЛ представляет собой объемный отпечаток на поверхности детали от воздействия РИ на заданную глубину.

Проанализируем напряженно-деформированное состояние ПЛ, образованной на плоской поверхности вследствие внедрения шара, который нагружен силой, действующей перпендикулярно этой поверхности (рис. 1, а).

Рассмотрим зоны, расположенные в центре ПЛ (в точке (т.) A) и на краю ПЛ (в т. B), образованные в результате нагружения шара некоторой силой P . Однако характер деформаций в этих зонах разный. Если в центре ПЛ материал испытывает преимущественно деформацию сжатия, то на краю ПЛ — деформацию сдвига (рис. 1, б).

Исследуем шар, предварительно погруженный на глубину t_1 . При его дальнейшем погружении на глубину t_2 т. A перемещается в т. A' , т. B (с радиусом r_B) — в т. B' , а некоторая т. C (с большим радиусом r_C) — в т. C' . Для осу-

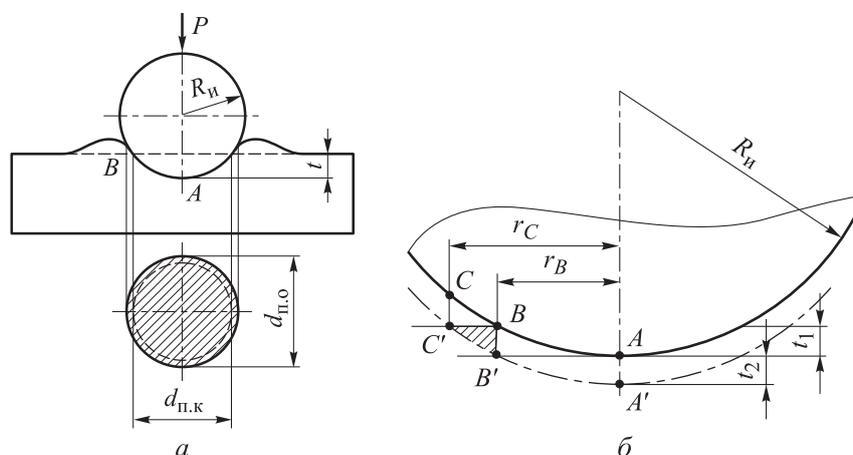


Рис. 1. Схемы формирования ПЛ (а) и перемещений (б) при нагружении шаровым индентором: $R_{ш}$ — радиус РИ; $d_{п.к}$ — диаметр пластического контакта без учета волны; $d_{п.о}$ — диаметр пластического отпечатка

ществления этих перемещений должен произойти сдвиг материала в клиновидной зоне $BB'C'$. Известно, что часть материала выдавливается на свободную поверхность, образуя упругопластический валик вокруг индентора.

При нагружении поверхности шаром возникает и разная степень деформации, так как жесткости материала в направлении действия силы и в перпендикулярном к ней направлении будут различаться. Также будет неодинаковой упругая разгрузка, так как зона A находится в глубине материала, а зона B — на поверхности.

Все это приведет к тому, что напряжения и степень упрочнения в зоне A будут больше, чем в зоне B . Эти выводы убедительно подтверждены экспериментально в работах [18–20]. Для повышения напряженного состояния на краю ПЛ разработана новая схема нагружения РИ [17], получившая название «орбитальное выглаживание».

Схема процесса орбитального выглаживания. На рис. 2 приведена схема орбитального выглаживания цилиндрической поверхности детали. Рабочий инструмент 1 внедряется в поверхностный слой цилиндрической детали 2 на глубину t под некоторым углом α , совершая вращение относительно вертикальной оси. При этом траектория вращения осевой линии РИ образует в пространстве коническую поверхность с углом при вершине 2α [17].

При разложении силы, направленной вдоль РИ, на составляющие получим касательные силы, которые действуют в плоскости поверхностного слоя, увеличивая размер лунки вслед-

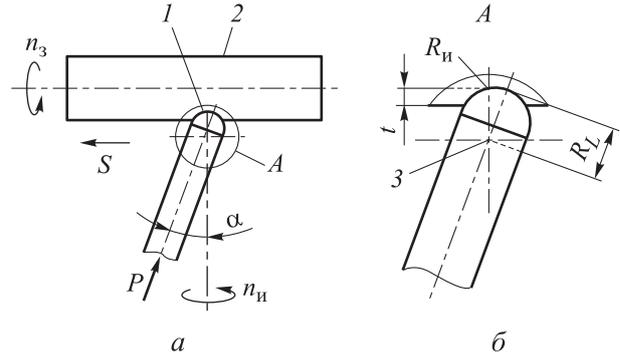


Рис. 2. Схемы орбитального выглаживания цилиндрической поверхности РИ (а) и рабочей зоны РИ (б):

1 — РИ; 2 — цилиндрическая деталь; 3 — центр орбитального вращения; R_L — радиус орбитального вращения; n_3 — частота вращения заготовки; n_n и S — частота вращения и подача РИ

ствие деформации от возникающих касательных напряжений.

Если при упрочнении плоских поверхностей РИ нагрузить вертикальной силой, то центр давления расположится в т. A (см. рис. 1, а). Если же силу направить под некоторым углом к поверхности изделия, то т. A сместится и будет проходить через осевую линию РИ. Реализовать такую схему конструктивно довольно сложно, так как нужна точка опоры, относительно которой будет вращаться РИ (рис. 3).

Такой опорой обычно является подшипник качения, установленный на стержневой части РИ. Однако в этом случае след от РИ будет представлять собой не пластический круг, а пластическое кольцо. И чем дальше распо-

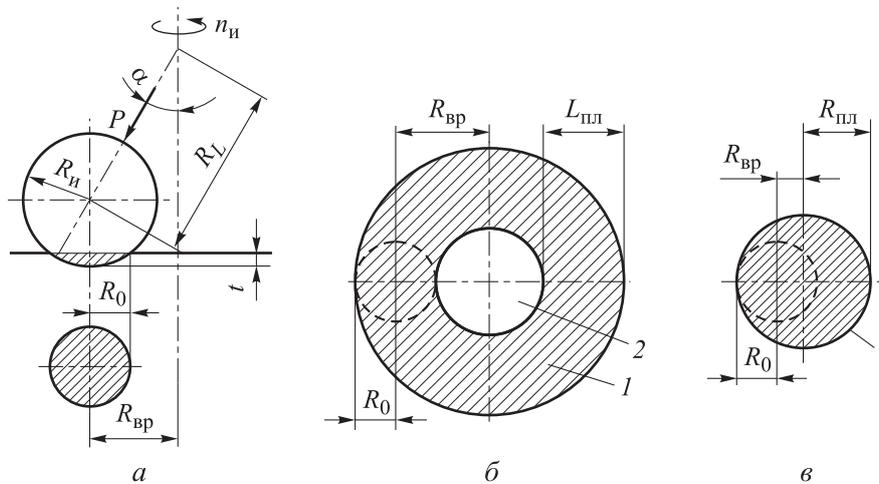


Рис. 3. Схемы орбитального выглаживания плоской поверхности (а), формирования пластической и упругой зон (б) и создания пластической зоны (в):

R_0 — радиус пластического отпечатка; $R_{вр}$ — радиус вращения РИ относительно вертикальной оси; $L_{пл}$ и $R_{пл}$ — ширина и радиус пластической зоны

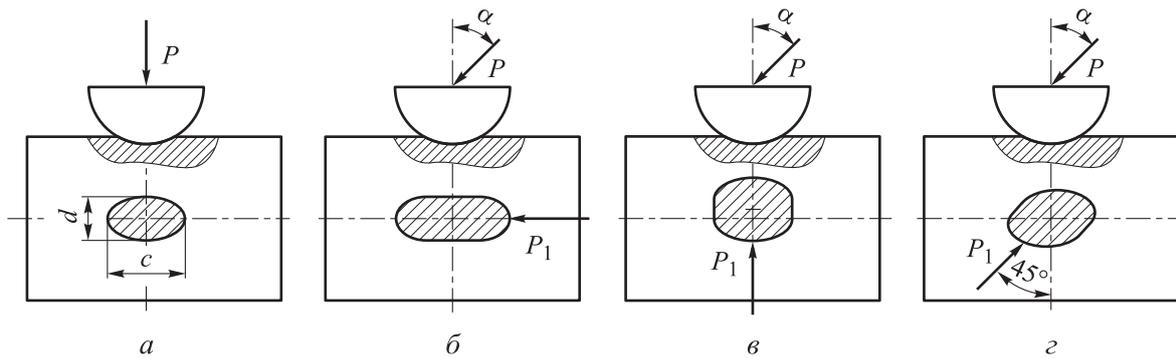


Рис. 4. Изменение формы, размеров и расположения центра тяжести пластического отпечатка при различном направлении составляющей силы P_1 :
 а — совпадающем с направлением силы P ; б и в — вдоль и перпендикулярно осевой линии цилиндра;
 з — под углом 45° к осевой линии цилиндра

жен подшипник от центра шара, тем больше будет диаметр пластического кольца (см. рис. 3).

Если радиус вращения РИ $R_{вр}$ будет меньше либо равен радиусу пластического отпечатка R_0 , то при вращении РИ относительно вертикальной оси под углом α будет формироваться полностью пластическая область (см. рис. 3, в). Если $R_{вр} > R_0$, то вместо ПЛ будет образовываться пластическое кольцо, центральная область которого находится в упругом состоянии (см. рис. 3, б).

Таким образом, форма и размеры пластической зоны РИ с изделием зависят не только от диаметра шарового элемента, но и от значения угла наклона индентора и радиуса его вращения.

При упрочнении цилиндрических поверхностей орбитальным выглаживанием пятно контакта будет иметь более сложную форму, чем при обработке плоской поверхности. Форма и размеры пластического отпечатка будут зависеть от направления угла наклона РИ относительно осевой линии цилиндрической детали.

Рассмотрим несколько положений РИ относительно оси обрабатываемой детали (рис. 4, а–з). При внедрении шара 1 в цилиндрическую поверхность детали 2 вертикальной силой P образуется пластическая зона в форме эллипса с размерами c и d . Если внешняя сила P действует под некоторым углом α , и ее наклон совпадает с направлением осевой линии цилиндра, то размер эллипса в направлении большой оси c возрастает (см. рис. 4, б).

Когда сила направлена перпендикулярно оси цилиндра и действует по касательной к обрабатываемой детали, увеличивается размер эллипса в направлении малой оси d , и смещается его центр тяжести (см. рис. 4, в). Если направление силы не совпадает ни с одной

из указанных осей, то происходит поворот главных осей эллипса и искажение его формы (см. рис. 4, з).

Таким образом, качественно установлено, что при орбитальном вращении индентора происходит постоянное изменение формы и размеров пластического отпечатка в рабочей зоне.

Для численного определения размеров и площади пластической зоны в виде ПЛ при орбитальном выглаживании цилиндрической поверхности использовано компьютерное моделирование с помощью программы SolidWorks.

Методика моделирования ПЛ. Для проведения расчетов при орбитальном выглаживании требуется построить геометрическую модель в виде цилиндра и стержня с шаровым наконечником, используя следующую методику.

Чтобы создать модель в среде трехмерного твердотельного моделирования программы SolidWorks, вначале строят эскиз цилиндрической заготовки нужного диаметра, и с помощью операции New-Part — модель заготовки (рис. 5). Затем выбирают плоскость, в которой будет создан эскиз модели РИ и ось орбитального вращения, и задают радиусы орбитального

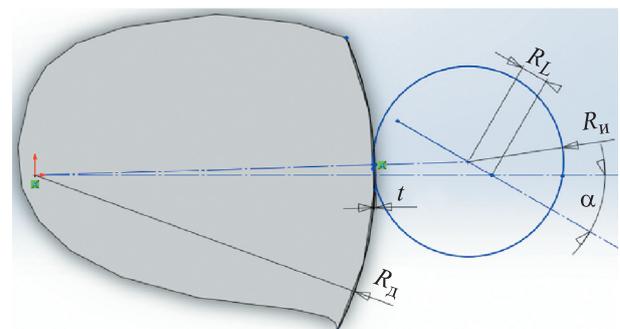


Рис. 5. Создание эскиза заготовки и РИ (R_d — радиус детали)

вращения и РИ, величину внедрения (натяг) и угол наклона РИ. Эти параметры можно легко изменять в режиме редактирования.

Далее посредством операции Revolved cut с поверхности модели детали удаляют тот объем, который занимает модель РИ при заданном значении технологического натяга. В итоге получают область ПЛ заготовки с РИ. С помощью

команды Evaluate — Section Properties определяют расчетную площадь пластической зоны и ее размеры.

Результаты исследования. В качестве примера на рис. 6 показаны формы и геометрические характеристики проекции ПЛ на плоскость при угле наклона РИ $\alpha = 0, 15, 30, 45$ и 60° .

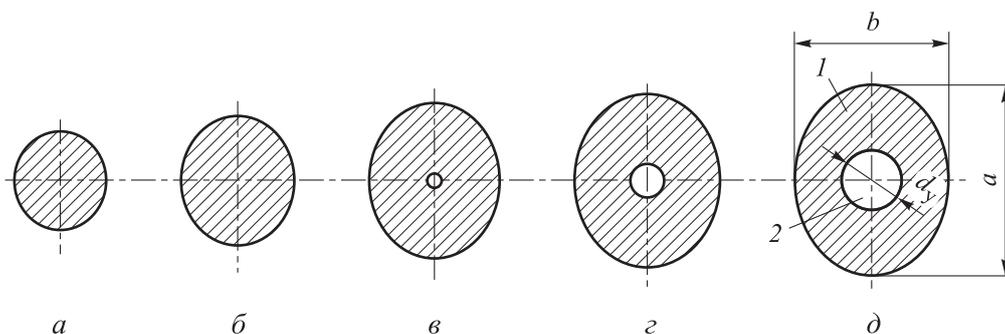


Рис. 6. Форма и геометрические характеристики пластического отпечатка при угле наклона РИ $\alpha = 0$ (а), 15 (б), 30 (в), 45 (г) и 60° (д):
1 — пластическая зона; 2 — упругая зона

Влияние параметров орбитального выглаживания на геометрические характеристики и площадь ПЛ

Параметр	Значение	Геометрические характеристики ПЛ, мм			Площадь ПЛ F_p , мм ²
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>d_y</i>	
Угол наклона РИ α , град	0	2,33	2,07	0	3,79
	15	3,98	3,27	0	10,26
	30	5,69	4,39	0,13	19,76
	45	7,28	5,37	0,60	30,02
	60	8,53	6,11	0,94	39,03
Радиус РИ R_n , мм	3	4,79	4,09	0,60	14,31
	5	5,29	4,29	0,34	17,56
	7	5,69	4,39	0,13	19,76
	9	6,05	4,47	0	21,40
	11	6,38	4,50	0	22,77
Радиус орбитального вращения R_L мм	2	4,49	3,62	0	12,83
	3	5,69	4,39	0,13	19,76
	4	6,97	5,18	0,51	27,87
	5	8,28	5,96	0,86	37,15
	6	9,61	6,75	1,24	47,49
Диаметр детали D , мм	30	5,90	3,93	0,05	18,56
	40	5,78	4,22	0,10	19,33
	50	5,69	4,39	0,13	19,76
	60	5,66	4,56	0,15	20,14
	70	5,63	4,62	0,18	20,41

Анализ данных компьютерного моделирования показывает, что при обработке орбитальным выглаживанием цилиндрической поверхности форма ПЛ представляет собой правильную геометрическую фигуру (эллипс), полученную в результате вращения РИ под углом к поверхности изделия. При орбитальном вращении РИ под углом $\alpha \leq 15^\circ$ (рис. 5, а и б) формируется полностью пластическая область. Если угол $\alpha > 30^\circ$, то вместо пластического круга формируется пластическое кольцо, центральная область которого находится в упругом состоянии.

В таблице приведены результаты расчета по определению влияния угла наклона РИ α , радиуса РИ, радиуса орбитального вращения и диаметра детали D на геометрические характеристики ПЛ (длину a , ширину b , диаметр упругой зоны пластического отпечатка d_r) и площадь ПЛ F_n . В качестве базовых параметров приняты: глубина погружения РИ $t = 0,1$ мм; угол наклона РИ $\alpha = 30^\circ$; радиус РИ $R_n = 7$ мм; радиус орбитального вращения $R_L = 3$ мм; диаметр детали $D = 50$ мм.

Определенные предложенным методом площадь ПЛ и конфигурация пластической зоны хорошо согласуются с результатами эксперимента, полученными при непосредственном внедрении индентора в металлические образцы с последующим измерением контактной площади под микроскопом [1, 5, 7].

Таким образом, в результате конечно-элементного моделирования орбитального выглаживания установлено, что пластический отпечаток имеет эллипсообразную форму, которая меняет направление главных осей при вращении РИ. Наклон РИ приводит к сдвигу материала в направлении внешней нагрузки. В итоге

происходит не только уплотнение материала (как при обычном ППД), но и дробление его структуры.

Выявлено, что с возрастанием угла наклона РИ увеличивается площадь контактной поверхности, которая приводит к снижению соответствующего давления. При уменьшении угла наклона РИ контактное давление повышается, а сдвиговые процессы сокращаются. Отсюда следует, что угол наклона РИ должен быть рациональным. Диаметр детали в исследованном диапазоне оказывает незначительное влияние на размеры пластического отпечатка.

Выводы

1. Установлено, что при орбитальном выглаживании угол наклона РИ и радиус орбитального вращения оказывают большее влияние на геометрические размеры и площадь ПЛ, чем радиус РИ и диаметр детали. При увеличении угла наклона РИ с 0 до 60° , радиуса РИ с 3 до 11 мм и радиуса орбитального вращения с 2 до 6 мм длина ПЛ возрастает в 1,3–3,6 раза, ширина ПЛ — в 1,1–3,0 раза, а площадь ПЛ в 3,7–10,3 раза. В исследованном диапазоне диаметр детали незначительно влияет на размеры и площадь ПЛ: при его увеличении с 30 до 70 мм ширина и площадь ПЛ возрастают в 1,1 раза, а длина лунки снижается в 1,05 раз.

2. Результаты расчетов позволяют утверждать, что по сравнению со статическим выглаживанием орбитальное является более производительным технологическим процессом, так как за счет увеличения площади пластического отпечатка можно повышать подачу инструмента и (или) частоту вращения заготовки.

Литература

- [1] Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Справочник. Москва, Машиностроение, 1987. 328 с.
- [2] Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С. Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. Упрочняющие технологии и покрытия, 2012, № 7, с. 7–12.
- [3] Жуков М.Ф., Фомин В.М., ред. Высокоэнергетические процессы обработки материалов. Т. 18. Низкотемпературная плазма. Новосибирск, Наука, 2000. 425 с.
- [4] Решетов Д.Н., ред. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-1: Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. Москва, Машиностроение, 1995. 864 с.
- [5] Суслов А.Г., ред. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. Справочник. В 2 т. Т. 1. Москва, Машиностроение, 2014. 480 с.

- [6] Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С., Сауткина М.А., Скрынник В.А., Лихачев А.П. Обеспечение качества поверхности деталей машин ультразвуковым пластическим деформированием перед нанесением покрытия. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2013, № 2, с. 4–7.
- [7] Киричек А.В., ред. *Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки*. Москва, Издательский дом «Спектр», 2014. 403 с.
- [8] Попов М.Е. Ударно-импульсная обработка деталей инструментом с пружинным приводом. *СТИН*, 2007, № 5, с. 24–27.
- [9] Лебедев В.А. *Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования*. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2006. 183 с.
- [10] Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С. Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2011, № 3, с. 11–17.
- [11] Папшев Д.Д. *Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 1978. 152 с.
- [12] Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2018, № 3, с. 129–139, doi: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139
- [13] Зайдес С.А., Нго К.К. *Поверхностное деформирование в стесненных условиях*. Иркутск, Изд-во ИРНТУ, 2019. 236 с.
- [14] Серга Г.В. Исследование процессов поверхностно-пластического деформирования деталей в винтовых роторах. *Высокие технологии в машиностроении: сб. науч. тр.* Харьков, ХГПУ, 1999, с. 45–52.
- [15] Зайдес С.А., Фам Д.Ф., Нго К.К. *Новые процессы поверхностного пластического деформирования*. Иркутск, Изд-во ИРНТУ, 2019. 352 с.
- [16] Зайдес С.А., Бобровский И.Н., Фам В.А. Влияние кинематики локального деформирования на напряженное состояние поверхностного слоя. *Научно-технические технологии в машиностроении*, 2019, № 5, с. 32–38, doi: 10.30987/article_5ca3030a5bfe86.87759559
- [17] Зайдес С.А., Фам В.А. *Способ поверхностного пластического деформирования*. Патент РФ № 2707844, 2019.
- [18] Емельянов В.Н. *Правка деталей машин поверхностным пластическим деформированием*. Новгород, НовГУ, 1996. 127 с.
- [19] Пашков А.Е. *Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей*. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2005. 138 с.
- [20] Смелянский В.М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2002. 300 с.

References

- [1] Odintsov L.G. *Uprochneniye i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniyem. Spravochnik* [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation. Guide]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1987. 328 p.
- [2] Blyumenshteyn V.Yu., Krechetov A.A., Makhalov M.S. State-of-the-Art competitive technologies of finishing and strengthening treatment with surface plastic deformation. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*, 2012, no. 7, pp. 7–12 (in Russ.).
- [3] *Vysokoenergeticheskiye protsessy obrabotki materialov. T. 18. Nizkotemperaturnaya plazma* [High-energy processes of materials processing. Vol. 18. Low-Temperature plasma]. Ed. Zhukov M.F., Fomin V.M. Novosibirsk, Nauka publ., 2000. 425 p.
- [4] *Mashinostroyeniye. Entsiklopediya. T. IV-1: Detali mashin. Konstruktsionnaya prochnost'. Treniye, iznos, smazka* [Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. IV-1: Machine parts. Structural strength. Friction, wear, lubrication]. Ed. Reshetov D.N. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1995. 864 p.

- [5] *Tekhnologiya i instrumenty otdelochno-uprochnyayushchey obrabotki detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniyem. Spravochnik* [Technology and tools for finishing and strengthening parts processing by surface plastic deformation. Guide]. Ed. Suslov A.G. Vol. 1. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2014. 480 p.
- [6] Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S., Sautkina M.A., Skrynnik V.A., Likhachev A.P. Providing of substrate surface quality prior to coating by ultrasonic plastic deformation treatment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)*, 2013, no. 2, pp. 4–7 (in Russ.).
- [7] *Effektivnyye tekhnologii poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya i kombinirovannoy obrabotki* [Effective technologies for surface plastic deformation and combined processing]. Ed. Kirichek A.V. Moscow, Spektr publ., 2014. 403 p.
- [8] Popov M.E. Shock-pulse machining of parts with a spring-driven tool. *STIN*, 2007, no. 5, pp. 24–27 (in Russ.).
- [9] Lebedev V.A. *Tekhnologiya dinamicheskikh metodov poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya* [Technology of dynamic methods of surface plastic deformation]. Rostov-na-Donu, DGTU publ., 2006. 183 p.
- [10] Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S. Surface geometry condition forecasting after ultrasonic surface plastic deformation of cylinders made of steel. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)*, 2011, no. 3, pp. 11–17 (in Russ.).
- [11] Papshev D.D. *Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniyem* [Finishing and strengthening treatment by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1978. 152 p.
- [12] Zaydes S.A. New surface plastic deformation techniques in the manufacture of machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2018, no. 3, pp. 129–139, doi: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139
- [13] Zaydes S.A., Ngo K.K. *Poverkhnostnoye deformirovaniye v stesnennykh usloviyakh* [Surface deformation under tight conditions]. Irkutsk, IRNITU publ., 2019. 236 p.
- [14] Serga G.V. Investigation of surface-plastic deformation of parts in screw rotors. *Vysokiye tekhnologii v mashinostroyenii. Sb. tr. KhGPU High technologies in mechanical engineering* [High technologies in mechanical engineering. Collection of works of KhSPU]. Kharkiv, KhSPU, 1999, pp. 45–52.
- [15] Zaydes S.A., Fam D.F., Ngo K.K. *Novyye protsessy poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya* [New processes of surface plastic deformation]. Irkutsk, IRNITU publ., 2019. 352 p.
- [16] Zaydes S.A., Bobrovskiy I.N., Fam V.A. Impact of local deformation kinematics upon stressed state of surface layer. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*, 2019, no. 5, pp. 32–38 (in Russ.), doi: 10.30987/article_5ca3030a5bfe86.87759559
- [17] Zaydes S.A., Fam V.A. *Sposob poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya* [Method of surface plastic deformation]. Patent no. 2707844 RF, 2019.
- [18] Emel'yanov V.N. *Pravka detaley mashin poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniyem* [Editing machine parts by surface plastic deformation]. Novgorod, NovGU publ., 1996. 127 p.
- [19] Pashkov A.E. *Tekhnologicheskiye svyazi v protsesse izgotovleniya dlinnomernykh listovykh detaley* [Technological connections in the process of manufacturing long sheet parts]. Irkutsk, IrGTU publ., 2005. 138 p.
- [20] Smelyanskiy V.M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniyem* [Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2002. 300 p.

Статья поступила в редакцию 15.10.2020

Информация об авторах

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

ФАМ Ван Ань — аспирант кафедры «Машиностроительные технологии и материалы». ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: vananhtdh0202@gmail.com).

КЛИМОВА Лариса Генриховна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная и компьютерная графика». ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: larisgoko@yandex.ru).

Information about the authors

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

PHAM Van Anh — Postgraduate, Mechanical Engineering Technologies and Materials. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: vananhtdh0202@gmail.com).

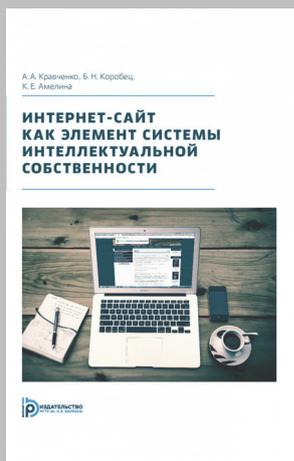
KLIMOVA Larisa Genrikhovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering and Computer Graphics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: larisgoko@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайдес С.А., Фам Ван Ань, Климова Л.Г. Влияние параметров рабочего инструмента на пластический отпечаток при орбитальном выглаживании цилиндрических деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 2, с. 9–17, doi: 10.18698/0536-1044-2021-2-9-17

Please cite this article in English as:

Zaides S.A., Pham Van Anh, Klimova L.G. Impact of Working Tool Parameters upon Plastic Imprint During Orbital Burnishing of Cylindrical Parts. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 2, pp. 9–17, doi: 10.18698/0536-1044-2021-2-9-17



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает научное издание**

«Интернет-сайт как элемент системы интеллектуальной собственности»

Авторы: А.А. Кравченко, Б.Н. Коробец, К.Е. Амелина

В книге рассмотрены особенности интернет-сайтов, их контента, а также отдельных компонентов интернет-сайтов с точки зрения категорий интеллектуальной собственности. Отдельная глава посвящена процедурам установления возможных режимов охраны интернет-сайтов как одного из факторов, влияющих на выбор стратегии их охраны.

Издание предназначено для специалистов в области управления интеллектуальной собственностью.

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