

УДК 621.787.4

doi: 10.18698/0536-1044-2023-3-34-45

Оценка геометрических параметров отпечатка и давления в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой при реверсивном поверхностном пластическом деформировании

С.А. Зайдес, Хыу Хай Нгуен

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Evaluation of the Imprint Geometric Parameters and Pressure in the Working Tool Contact Zone under the Reversible Surface Plastic Deformation

S.A. Zaides, Huu Hai Nguyen

Irkutsk National Research Technical University

Приведены результаты моделирования влияния параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на геометрические параметры пластического отпечатка и давление в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой при статическом и реверсивном воздействиях. С помощью программного обеспечения SolidWorks-2019 и ANSYS-19.1 построена конечно-элементная модель контактной зоны для определения геометрических параметров пластического отпечатка и давления в зависимости от геометрических параметров и реверсивной частоты вращения рабочего инструмента, начального угла установки и амплитуды угла реверсивного вращения рабочего инструмента. Установлено, что геометрические и кинематические параметры рабочего инструмента оказывают значительное влияние на геометрические параметры пластического отпечатка и давление в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой при реверсивном поверхностном пластическом деформировании. На основе полученных результатов для повышения давления в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой, влияющего на степень упрочнения и сглаживание микронеровностей поверхности заготовки и формирование сжимающих остаточных напряжений, рекомендовано использовать следующие параметры тороидального ролика: диаметр — 20...30 мм; профильный радиус — 2,0...2,5 мм; расстояние между вершинами профиля — 1,5...2,0 мм, начальный угол установки — 90°; амплитуда угла реверсивного вращения — $\pm 6... \pm 8^\circ$; реверсивная частота вращения — 200...240 дв.ход/мин.

Ключевые слова: реверсивное поверхностное пластическое деформирование, кинематические параметры, пластический отпечаток, контактное давление, реверсивная частота вращения

The article presents the results of modeling and determining the influence of the parameters of reverse surface plastic deformation on the geometric characteristics of the plastic imprint and the pressure in the contact zone of the working tool under static and reverse impact. Using the software for 3D design SolidWorks-2019 and computational modeling in ANSYS-19.1, a finite element model of the contact zone was built to determine the geometric characteristics of the plastic indentation and the contact pressure between the working tool and

the surface of the workpiece, depending on the geometry of the working tool, reversing frequency its rotation, the initial angle of installation and the amplitude of the angle of reverse rotation of the working tool. Based on the obtained results, to increase the pressure in the contact zone of the working tool with the workpiece, which affects the degree of hardening and smoothing of microroughnesses of the workpiece surface and the formation of compressive residual stresses, it is recommended to use the following parameters and hardening modes: working roller with a diameter of 20–30 mm, with a profile radius of 2–2.5 mm, distance between tops of working roller profile 1.5–2 mm, initial installation angle of the working roller 90°, amplitude of the reverse rotation angle of the working roller $\pm 6 - \pm 8^\circ$ and reverse speed of the working roller 200–240 double strokes/min.

Keywords: reversible surface plastic deformation, kinematic parameters, plastic imprint, contact pressure, reverse rotation speed

Качество изготовления некоторых ответственных деталей машин необходимо повышать и в первую очередь точность и шероховатость, которые можно обеспечить при отделочно-упрочняющей обработке [1–3]. На производстве применяют различные способы отделочно-упрочняющей обработки, повышающие надежность деталей машин.

В последние годы все более широкое распространение получает безрежущий метод обработки, основанный на принципе тонкого пластического деформирования поверхности металла в холодном состоянии, называемый поверхностным пластическим деформированием (ППД) [4–6]. Применение ППД вместо обработки резанием позволяет снизить шероховатость поверхности детали, повысить твердость и износостойкость ее поверхностного слоя, пределы текучести и усталости материала [7, 8].

На основе тонкого пластического деформирования металла в холодном состоянии под давлением рабочих инструментов (РИ) — роликов, шариков — с большей твердостью, чем у заготовки, пластически деформируются микронеровности поверхности, а в поверхностном слое образуются остаточные напряжения сжатия [5, 8–10].

В настоящее время разработано достаточно много способов ППД на основе разнообразных по форме деформирующих элементов [11–13]. Каждый вид воздействия и форма деформирующих элементов оставляют пластический отпечаток (ПО) на поверхности заготовки, а при его перемещении образуется след от обработки. Наложение следов позволяет полностью упрочнить обрабатываемую поверхность детали [14, 15].

По форме и размерам ПО можно судить о геометрических параметрах изделия и РИ, величине силового воздействия, качестве обраба-

тываемой поверхности, образовании упруго-пластической волны, наличии вибрации технологической системы и др. [16, 17].

Известные РИ обычно выполняют движения с достаточно простой кинематикой. В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разработаны новые технологические процессы ППД на основе более сложной кинематики РИ [18–20].

Предлагаемый способ ППД основан на реверсивном вращении тороидального ролика (ТР) [21]. Кинематические и геометрические параметры РИ оказывают непосредственное влияние на напряженно-деформированное состояние и степень упрочнения поверхностного слоя детали [22, 23].

Цель работы — определение геометрических параметров ПО и давления в зоне контакта РИ с поверхностью цилиндрических деталей (далее контактное давление), упрочненных реверсивным ППД.

Способ реверсивного ППД. Схемы реверсивного ППД цилиндрической заготовки двухрадиусным ТР, его рабочей зоны и реверсивного вращения приведены на рис. 1.

Отличительная особенность предлагаемого способа заключается в том, что деформирующий элемент выполнен в виде двухрадиусного ТР, вершины которого расположены относительно друг друга на расстоянии l , а ось его вращения — параллельно оси заготовки. Двухрадиусному ТР сообщают реверсивное вращение относительно оси, проходящей через плоскость, соединяющую два ролика деформирующего элемента и перпендикулярную оси заготовки, с амплитудой угла α_r . В процессе обработки первый ролик частично работает в зоне очага деформации, создаваемого вторым элементом деформирующего инструмента.

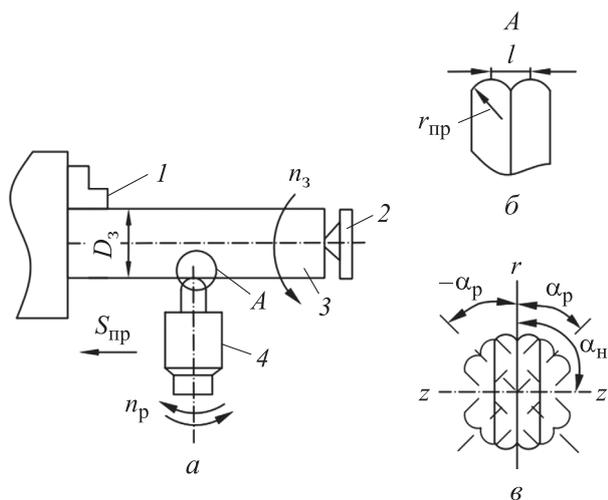


Рис. 1. Схемы реверсивного ППД двухрадиусным ТР (а), его рабочей зоны (б) и реверсивного вращения (в)

Кинематику процесса определяют следующие параметры режима (см. рис. 1): частота вращения заготовки n_3 ; продольная подача ТР $S_{пр}$; реверсивная частота вращения ТР n_p ; амплитуда угла реверсивного вращения ТР α_p .

Заготовку 3 устанавливают на токарно-винторезном станке, закрепляют в трехкулачковом патроне 1 и поджимают вращающимся центром задней бабки 2. Заготовке придают вращательное движение с частотой n_3 , мин⁻¹. Одновременно двухрадиусному ТР 4 сообщают продольную подачу $S_{пр}$ и реверсивное вращение n_p вокруг своей оси.

Схемы формирования ПО на поверхности заготовки при статическом и реверсивном ППД приведены на рис. 2.

При статическом ППД (рис. 2, а) ПО имеет форму эллипса с большой a и малой b осями, а при реверсивном ППД (рис. 2, б) — более сложную форму с большой a_1 и малой b_1 осями по сравнению со статическим отпечатком. Таким образом, форма, размеры ПО и контактное давление зависят не только от геометрических, но и от кинематических параметров РИ при реверсивном ППД.

Методика определения ПО. При статическом упрочнении размеры, форму и площадь пластического отпечатка ТР $S_{отп}$ на поверхности заготовки определяли с помощью компьютерного моделирования на основе программы SolidWorks-2019. Для расчета контактного давления использовали вычислительное моделирование в среде ANSYS-19.1 [24, 25].

Эскиз РИ с необходимыми параметрами — диаметром ТР D_p , профильным радиусом ТР $r_{пр}$, радиальным натягом (глубиной внедрения) t — и ПО на поверхности заготовки приведены на рис. 3.

Окна программы для измерения площади и размеров ПО показаны на рис. 4.

Для исследования влияния геометрических и кинематических параметров РИ на ПО и контактное давление при реверсивном ППД использованы семь параметров технологического

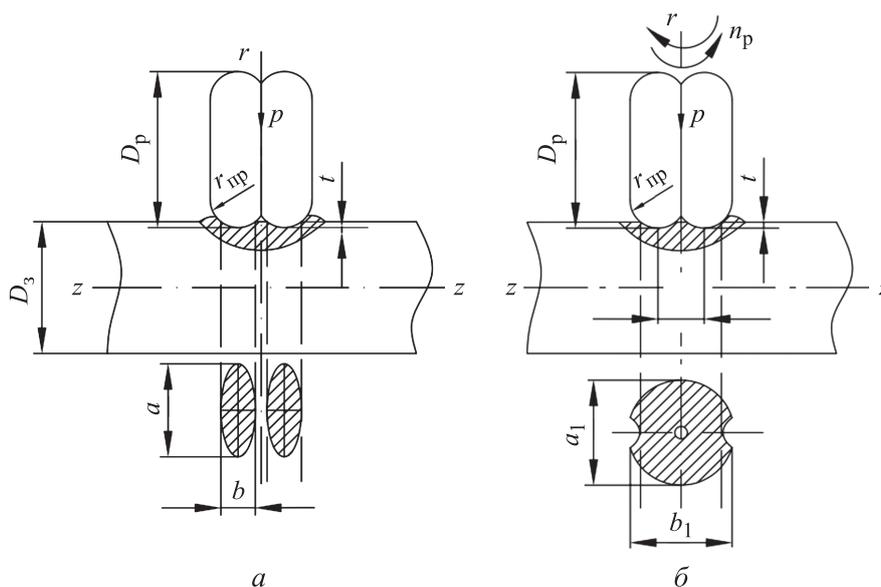


Рис. 2. Схемы формирования ПО на поверхности заготовки при статическом (а) и реверсивном (б) ППД

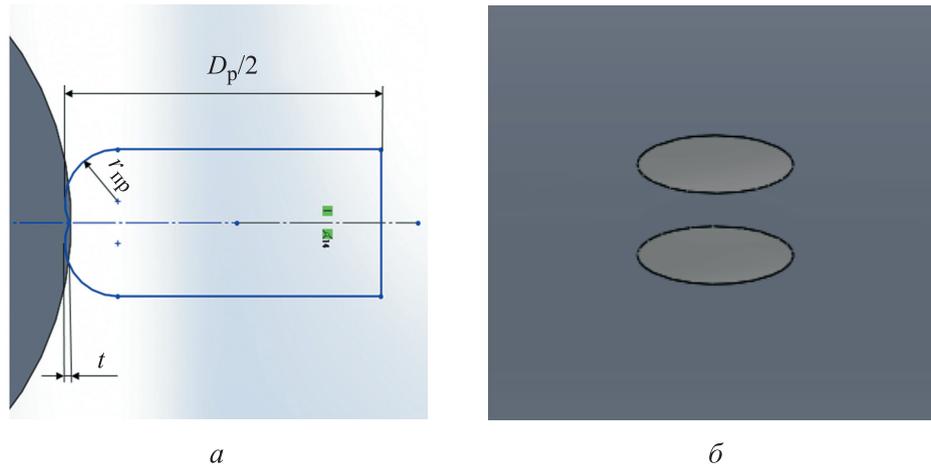


Рис. 3. Эскиз РИ (а) и ПО (б) на поверхности заготовки

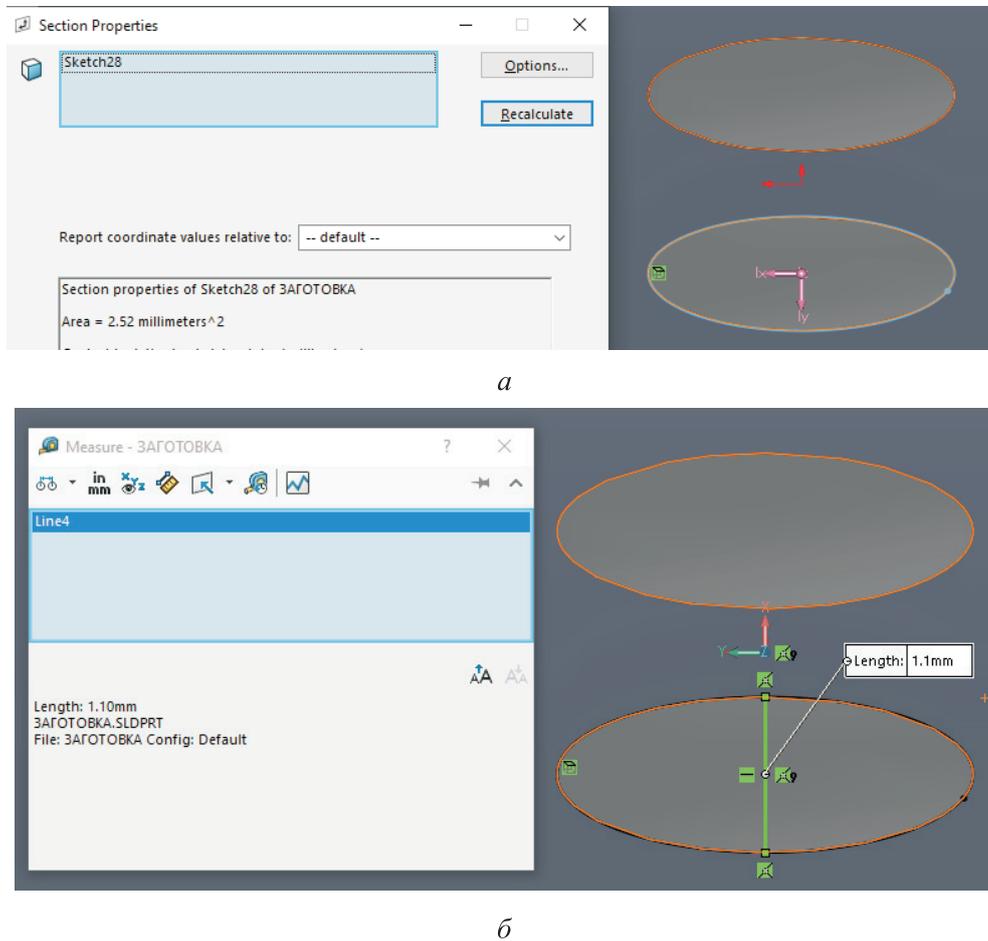


Рис. 4. Окна программы для измерения площади (а) и размеров (б) ПО

процесса: диаметр заготовки D_3 , диаметр ТР D_p и его профильный радиус $r_{пр}$, расстояние между вершинами профиля ТР l , начальный угол установки ТР α_n , амплитуда угла реверсивного вращения α_p и реверсивная частота вращения ТР n_p .

Для расчета размеров ПО и контактного давления выбраны следующие параметры ТР и

режимы обработки: диаметр ТР $D_p = 15...75$ мм; профильный радиус ТР $r_{пр} = 2...4$ мм; расстояние между вершинами профиля ТР $l = 0,5...2,5$ мм; материал ТР — твердый сплав ВК8; модуль упругости материала $E = 600$ ГПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; реверсивная частота вращения ТР $n_p = 60...300$ дв.ход/мин; началь-

ный угол установки ТР $\alpha_n = 0 \dots 90^\circ$; амплитуда угла реверсивного вращения ТР $\alpha_p = 0 \dots \pm 60^\circ$; коэффициент трения в зоне контакта ТР с поверхностью заготовки $f = 0,1$.

Заготовки имели следующие характеристики: вид — цилиндры диаметром $D_3 = 20 \dots 60$ мм; материал — сталь 45 — упругопластический, упрочняющийся; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала — билинейная (предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 6,8$ ГПа).

Результаты компьютерного моделирования.

Базовые режимы обработки, принятые постоянными при варьировании одного из параметров реверсивного ППД, приведены в табл. 1.

Влияние диаметра заготовки на геометрические параметры ПО и контактное давление. Результаты исследования влияния диаметра заготовки на геометрические параметры ПО приведены в табл. 2, а зависимости суммарной площади ПО $\Sigma S_{отп}$ и контактного давления p от диаметра заготовки — на рис. 5.

Анализ данных, приведенных в табл. 2 и на рис. 5 показывает, что чем больше диаметр заготовки, тем длиннее ось эллипса a , больше суммарная площадь ПО $\Sigma S_{отп}$ и тем меньше контактное давление p . Возрастание диаметра заготовки с 20 до 60 мм приводит к увеличению длины большой оси эллипса a и суммарной площади ПО в 1,29 раз и к уменьшению контактного давления p в 1,24 раза (при этом малая ось эллипса b остается неизменной).

Таблица 1

Базовые режимы реверсивного ППД

Параметр	Значение
Диаметр ТР D_p , мм	30
Профильный радиус ТР $r_{пр}$, мм	2,5
Расстояние между вершинами профиля ТР l , мм	2,0
Диаметр заготовки D_3 , мм	30
Начальный угол установки ТР α_n , град	90
Глубина внедрения ТР t , мм	0,1
Амплитуда угла реверсивного вращения ТР α_p , град	± 15
Реверсивная частота вращения ТР n_p , дв.ход/мин	120

Таблица 2

Результаты исследования влияния диаметра заготовки на геометрические параметры ПО

Диаметр заготовки D_3 , мм	a , мм	b , мм	$S_{отп}$, мм ²
20	2,19	1,40	2,41
30	2,45	1,40	2,70
40	2,62	1,40	2,88
50	2,74	1,40	3,02
60	2,83	1,40	3,11

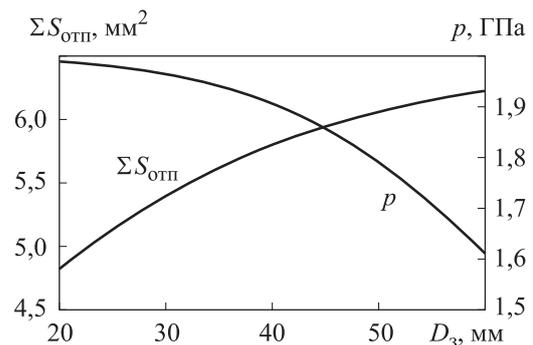


Рис. 5. Зависимости суммарной площади ПО $\Sigma S_{отп}$ и контактного давления p от диаметра заготовки D_3

Влияние диаметра ТР на геометрические параметры ПО и контактное давление. Результаты исследования влияния диаметра ТР на геометрические параметры ПО приведены в табл. 3, а зависимости суммарной площади ПО и контактного давления от диаметра ТР — на рис. 6.

Анализ данных, приведенных в табл. 3 и на рис. 6, свидетельствует о том, что чем больше диаметр ТР, тем больше ось эллипса a и суммарная площадь ПО и тем меньше контактное давление. Возрастание диаметра ТР с 15 до 75 мм приводит к увеличению оси эллипса a и суммарной площади ПО в 1,46 раз и уменьшению контактного давления p в 1,10 раз (при этом малая ось эллипса b не изменяется).

Таблица 3

Результаты исследования влияния диаметра ТР на геометрические параметры ПО

Диаметр ТР D_p , мм	a , мм	b , мм	$S_{отп}$, мм ²
15	2,00	1,40	2,20
30	2,45	1,40	2,70
45	2,68	1,40	2,96
60	2,83	1,40	3,11
75	2,92	1,40	3,21

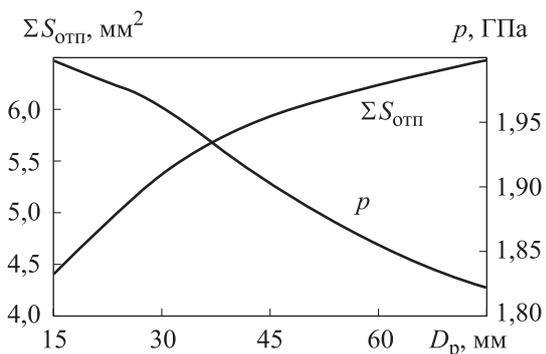


Рис. 6. Зависимости суммарной площади ПО $\Sigma S_{отп}$ и контактного давления p от диаметра ТР D_p

Влияние профильного радиуса ТР на геометрические параметры ПО и контактное давление. Результаты исследования влияния профильного радиуса ТР на геометрические параметры ПО приведены в табл. 4, а зависимости суммарной площади ПО и контактного давления от профильного радиуса ТР — на рис. 7.

Из табл. 4 и рис. 7 следует, что чем больше профильный радиус ТР, тем длиннее малая ось эллипса b , больше суммарная площадь ПО и

Таблица 4

Результаты исследования влияния профильного радиуса ТР на геометрические параметры ПО

Профильный радиус ТР $r_{пр}$, мм	a , мм	b , мм	$S_{отп}$, мм ²
2,0	2,45	1,25	2,41
2,5	2,45	1,40	2,70
3,0	2,45	1,54	2,96
3,5	2,45	1,66	3,20
4,0	2,45	1,78	3,42

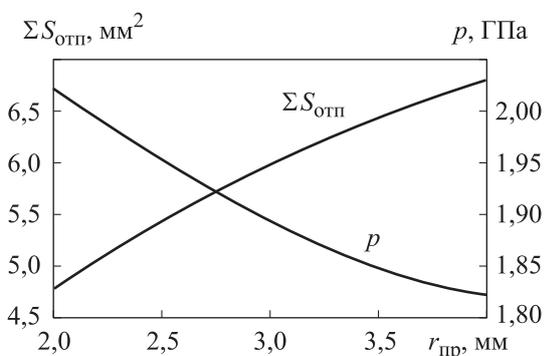


Рис. 7. Зависимости суммарной площади ПО $\Sigma S_{отп}$ и контактного давления p от профильного радиуса ТР $r_{пр}$

тем меньше контактное давление p . Возрастание профильного радиуса ТР с 2,0 до 4,0 мм приводит к увеличению малой оси эллипса b и суммарной площади ПО в 1,42 раза и уменьшению контактного давления p в 1,11 раз (при этом большая ось эллипса a остается неизменной).

Влияние расстояния между вершинами профиля ТР на геометрические параметры ПО и контактное давление. Результаты исследования влияния расстояния между вершинами профиля ТР на геометрические параметры ПО приведены в табл. 5, а зависимости суммарной площади ПО и контактного давления от расстояния между вершинами профиля ТР — на рис. 8.

Анализ данных, приведенных в табл. 5 и на рис. 8, показывает, что при увеличении расстояния между вершинами профиля ТР с 0,5 до 1,5 мм, малая ось эллипса b , суммарная площадь ПО и контактное давление p возрастают в 1,47; 1,38 и 1,16 раз соответственно, а большая ось эллипса a остается неизменной. При удлинении расстояния l с 1,5 до 2,5 мм размеры a , b и суммарная площадь ПО не из-

Таблица 5

Результаты исследования влияния расстояния между вершинами профиля ТР на геометрические параметры ПО

Расстояние между вершинами профиля ТР l , мм	a , мм	b , мм	$S_{отп}$, мм ²
0,5	2,45	0,95	1,95
1,0	2,45	1,20	2,46
1,5	2,45	1,40	2,70
2,0	2,45	1,40	2,70
2,5	2,45	1,40	2,70

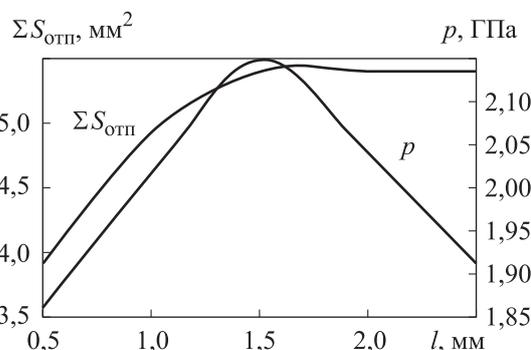


Рис. 8. Зависимости суммарной площади ПО $\Sigma S_{отп}$ и контактного давления p от расстояния между вершинами профиля ТР l

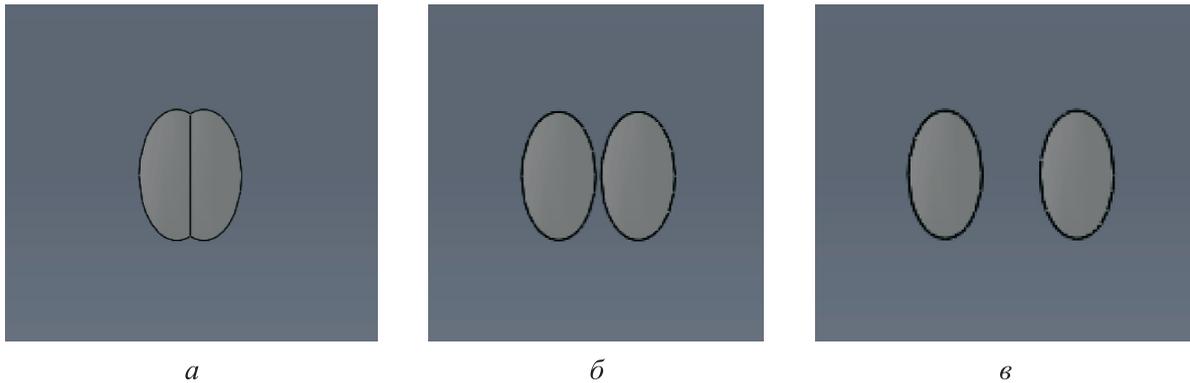


Рис. 9. Формы ПО при расстоянии между вершинами профиля ТР $l = 0,5$ (а), $1,5$ (б) и $2,5$ мм (в)

меняются, а контактное давление p уменьшается в 1,12 раз.

Увеличение или уменьшение указанных параметров объясняется тем, что при постоянной глубине внедрения ТР ($t = 0,1$ мм) и расстоянии между вершинами профиля ТР $0,5 \leq l \leq 1,2$ мм второй профиль РИ теряет деформирующие способности, вследствие чего можно считать, что двухрадиусный ролик работает почти как однорадиусный.

При $l > 1,8$ мм возникает слишком большое расстояние между ПО, что приводит к уменьшению количества наложенных друг на друга деформирующих отпечатков РИ, а это снижает рост дислокаций и искажение микроструктуры металла. Формы ПО при расстоянии между вершинами профиля ТР $l = 0,5; 1,5$ и $2,5$ мм приведены на рис. 9.

Влияние начального угла установки ТР на геометрические параметры ПО и контактное давление. Результаты исследования влияния начального угла установки ТР на геометрические параметры ПО приведены в табл. 6, а зависимости суммарной площади ПО и контактного давления от начального угла установки ТР — на рис. 10.

Таблица 6

Результаты исследования влияния начального угла установки ТР на геометрические параметры ПО

Начальный угол установки ТР α_n , град	a , мм	b , мм	$S_{отп}$, мм ²
0	2,92	1,10	2,53
30	2,84	1,19	2,66
45	2,72	1,27	2,71
60	2,58	1,34	2,72
90	2,45	1,40	2,70

Анализ данных, приведенных в табл. 6 и на рис. 10 свидетельствует о том, что при увеличении начального угла установки ТР с 0 до 90° размеры a , b , суммарная площадь ПО и контактное давление p изменяются неравномерно. Рост начального угла установки ТР с 0 до 90° приводит к уменьшению размера a в 1,19 раз и увеличению размера b и контактного давления p в 1,27 и 1,20 раз соответственно.

Максимальное значение суммарной площади ПО достигается при $\alpha_n = 60^\circ$, а минимальное — при $\alpha_n = 0^\circ$. Различие размеров ПО при разном угле контакта объясняется тем, что контактные поверхности между заготовкой и ТР представляют собой криволинейные плоскости.

Влияние амплитуды угла реверсивного вращения ТР на геометрические параметры ПО и контактное давление. Результаты исследования влияния амплитуды угла реверсивного вращения ТР на геометрические параметры ПО приведены в табл. 7, а зависимости суммарной площади ПО и контактного давления от амплитуды угла реверсивного вращения ТР — на рис. 11.

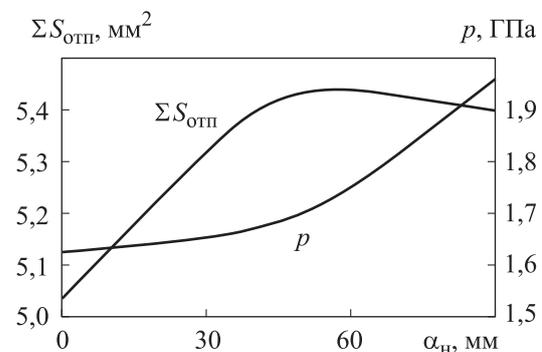


Рис. 10. Зависимости суммарной площади ПО $\Sigma S_{отп}$ и контактного давления p от начального угла установки ТР α_n

Таблица 7

Результаты исследования влияния амплитуды угла реверсивного вращения ТР на геометрические параметры ПО

Амплитуда угла реверсивного вращения ТР α_p , град	a_1 , мм	b_1 , мм	$S_{отп}$, мм ²
0	2,45	1,40	2,70
± 15	2,91	1,40	3,47
± 30	3,23	1,40	4,21
± 45	3,41	1,40	4,46
± 60	3,46	1,40	4,54

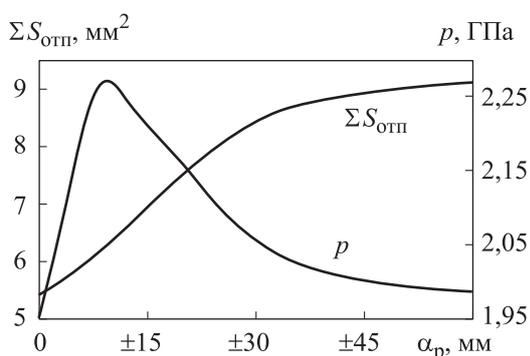


Рис. 11. Зависимости суммарной площади ПО $\Sigma S_{отп}$ и контактного давления p от амплитуды угла реверсивного вращения ТР α_p

Анализ данных, приведенных в табл. 7 и на рис. 11 показывает, что возрастание амплитуды угла реверсивного вращения ТР с 0 до $\pm 60^\circ$ приводит к увеличению большой оси эллипса a_1 и суммарной площади ПО в 1,41 и 1,68 раз соответственно (при этом малая ось b_1 не изменяется).

Следует отметить, что существует оптимальная амплитуда угла реверсивного вращения ТР ($\alpha_p = \pm 6... \pm 8^\circ$), при которой контактное давление достигает максимального значения (см. рис. 11). Рост амплитуды угла реверсивного вращения ТР с 0 до $\pm 7^\circ$ вызывает повышение контактного давления в 1,16 раз, а увеличение α_p с ± 7 до $\pm 60^\circ$ — его снижение в 1,14 раз. При отсутствии реверсивного движения ($\alpha_p = 0^\circ$) имеет место статическое нагружение, при котором создается небольшое контактное давление.

Влияние реверсивной частоты вращения ТР на контактное давление. Зависимость контактного давления от реверсивной частоты вращения ТР приведена на рис. 12.

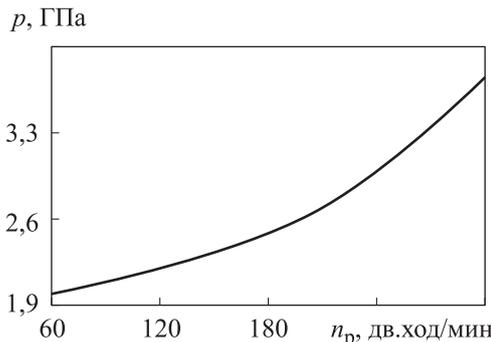


Рис. 12. Зависимость контактного давления p от реверсивной частоты вращения ТР n_p

Видно, что чем больше реверсивная частота вращения ТР, тем выше контактное давление. Возрастание реверсивной частоты вращения ТР с 60 до 300 дв.ход/мин приводит к увеличению контактного давления в 1,89 раз. Реверсивная частота вращения ТР является важнейшим параметром упрочнения, оказывающим существенное влияние на повышение контактного давления.

Результаты исследования показали, что геометрические и кинематические параметры РИ значительно влияют на геометрические параметры ПО и контактное давление при реверсивном ППД. Контактное давление в зоне взаимодействия РИ с поверхностью детали характеризует не только степень упрочнения материала и степень сглаживания микронеровностей поверхности, но и позволяет оценить уровень сжимающих остаточных напряжений.

Выводы

1. При статическом упрочнении ПО имеет форму эллипса, а при реверсивном ППД в зоне контакта РИ с поверхностью детали образуется некоторый контур за один цикл движения РИ. Контур этого отпечатка формируется при повороте двух эллипсов и влево, и вправо на некоторый угол α_p .

2. Для повышения контактного давления необходимо выбрать следующие параметры ТР: диаметр — 20...30 мм; профильный радиус — 2,0...2,5 мм; расстояние между вершинами профиля — 1,5...2,0 мм; начальный угол установки — 90° ; амплитуда угла реверсивного вращения — $\pm 6... \pm 8^\circ$; реверсивная частота вращения — 200...240 дв.ход/мин.

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] Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. *Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин*. Москва, Машиностроение, 1988. 239 с.
- [4] Блюменштейн В.Ю. Инновационные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием в транспортном комплексе. *Научные технологии в машиностроении*, 2019, № 8, с. 16–24, doi: https://doi.org/10.30987/article_5d2635cb370c77.32034089
- [5] Горленко О.А., Костенко Р.П. Технологическое обеспечение параметров шероховатости криволинейной поверхности при алмазном выглаживании. *СТИН*, 2000, № 6, с. 21–24.
- [6] Григорьев С.Н., Кропоткина Е.Ю. Выбор оптимального способа поверхностного пластического деформирования. *Вестник МГТУ СТАНКИН*, 2012, № 2, с. 144–147.
- [7] Махалов М.С. Расчетные модели остаточных напряжений поверхностного слоя после упрочнения способами поверхностного пластического деформирования. *Ползуновский альманах*, 2012, № 1. URL: http://elib.altstu.ru/journals/Files/pa2012_1/pdf/149mahalov.pdf
- [8] Гуров Р.В. Формирование качества поверхностного слоя при отделочных и отделочно-упрочняющих режимах отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. *Вестник БГТУ*, 2011, № 3, с. 67–73.
- [9] Трунин А.В., Сидякин Ю.И., Абакумова С.Ю. и др. Оценка интенсивности остаточных напряжений в валах при ППД. *Известия ВолГТУ*, 2013, № 20, с. 67–70.
- [10] Махалов М.С., Блюменштейн В.Ю. Механика процесса ППД. остаточные напряжения в упрочняемом упруго-пластическом теле. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2019, № 2, с. 110–123, doi: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.2-110-123>
- [11] Сидякин Ю.И., Осипенко А.П., Бочаров Д.А. Совершенствование технологии отделочно-упрочняющей обработки валов поверхностным пластическим деформированием. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2007, № 8, с. 23–26.
- [12] Полетаев В.А. Процессы поверхностного пластического деформирования. *NOVAINFO.RU*, 2018, № 80, с. 1–5.
- [13] Колобков А.В. Новые конструкции инструмента для поверхностного пластического деформирования отверстий деталей. *Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева*, 2008, № 1, с. 61–65.
- [14] Зайдес С.А. От пластического отпечатка при внедрении рабочего инструмента к созданию новых процессов отделочно-упрочняющей обработки. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2019, т. 15, № 9, с. 399–403.
- [15] Матлин М.М., Мозгунова А.И., Лебский С.Л. Прогнозирование параметров упрочнения деталей машин путем поверхностного пластического деформирования. *Известия ВолГТУ*, 2005, № 3, с. 52–55.
- [16] Кочетков А.В., Барац Ф.Я., Шашков И.Г. Обзор исследований отделочно-упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования. *Наукоедение*, 2013, № 4. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/38tvn413.pdf>
- [17] Коробейников В.В. Методы упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием. *Труды РГУПС*, 2016, № 3, с. 77–81.
- [18] Нго К.К., Зайдес С.А. Влияние кинематики локального поверхностного пластического деформирования на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2017, т. 21, № 3, с. 39–47, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-39-47>
- [19] Зайдес С.А., Хо М.К. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование цилиндрических заготовок. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 2022, № 5, с. 344–353, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-344-353>

- [20] Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Влияние кинематики тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние при поверхностном пластическом деформировании. *Металлообработка*, 2022, № 2, с. 40–48, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2022.2.40>
- [21] Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. *Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения*. Патент РФ 2758713. Заявл., 14.01.2021, опубл. 01.11.2021.
- [22] Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Влияние кинематики тороидального инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей машин. *Научные технологии в машиностроении*, 2022, № 6, с. 12–21, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-6-12-21>
- [23] Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Влияние основных параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей. *Системы. Методы. Технологии*, 2022, № 3, с. 7–15.
- [24] Vinciguerra V., Malgioglio G.L., Landi A. Modelling the elastic energy of a bifurcated wafer: a benchmark of the analytical solution vs. The ANSYS finite element analysis. *Compos. Struct.*, 2022, vol. 281, art. 114996, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114996>
- [25] Баков К.А. ANSYS. *Справочник пользователя*. Москва, ДМК Пресс, 2005. 650 с.

References

- [1] Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Strengthening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p. (In Russ.).
- [2] Smelyanskiy V.M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of hardening parts by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 300 p. (In Russ.).
- [3] Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodkin Yu.D. *Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin* [Surface layer and exploitation properties of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 239 p. (In Russ.).
- [4] Blyumenshteyn V.Yu. Innovation technologies in finish-strengthening with surface plastic deformation in transport complex. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2019, no. 8, pp. 16–24, doi: https://doi.org/10.30987/article_5d2635cb370c77.32034089 (in Russ.).
- [5] Gorlenko O.A., Kostenko R.P. Technological support for curvilinear surface roughness parameters in diamond smoothing. *STIN*, 2000, no. 6, pp. 21–24. (In Russ.).
- [6] Grigoryev S.N., Kropotkina E.Yu. Methodology for choosing an optimal technique for surface plastic forming. *Vestnik MGTU STANKIN* [Vestnik MSUT Stankin], 2012, no. 2, pp. 144–147. (In Russ.).
- [7] Makhalov M.S. Calculation model of residual stresses in a surface layer after hardening by surface plastic deformation. *Polzunovskiy almanakh*, 2012, no. 1. URL: http://elib.altstu.ru/journals/Files/pa2012_1/pdf/149mahalov.pdf (in Russ.).
- [8] Gurov R.V. Surface layer quality formation during finishing and finishing-strengthening modes of finishing-strengthening treatment by surface plastic deformation. *Vestnik BGTU* [Bulletin of Bryansk State Technical University], 2011, no. 3, pp. 67–73. (In Russ.).
- [9] Trunin A.V., Sidiyakin Yu.I., Abakumova S.Yu. et al. Assessment of residual stress intensity in shafts during RPM. *Izvestiya VolGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2013, no. 20, pp. 67–70. (In Russ.).
- [10] Makhalov M.S., Blyumenshteyn V.Yu. Surface plastic deformation mechanics. the residual stresses in the hardened elastic-plastic body. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Material Science], 2019, no. 2, pp. 110–123, doi: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.2-110-123> (in Russ.).
- [11] Sidiyakin Yu.I., Osipenko A.P., Bocharov D.A. Upgrading the shafts strain-hardening treatment by surface plastic deformation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2007, no. 8, pp. 23–26. (In Russ.).

- [12] Poletaev V.A. Processes of surface plastic deformation. *NOVAINFO.RU*, 2018, no. 80, pp. 1–5. (In Russ.).
- [13] Kolobkov A.V. New tool designs for surface plastic deformation of holes. *Vestnik RGATA im. P.A. Solovyeva* [Vestnik of P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University], 2008, no. 1, pp. 61–65. (In Russ.).
- [14] Zaydes S.A. From plastic imprint in implementation of working tool to creation of new processes of finishing and strengthening treatment. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2019, vol. 15, no. 9, pp. 399–403. (In Russ.).
- [15] Matlin M.M., Mozgunova A.I., Lebskiy S.L. Prediction of hardening parameters of machine parts by surface plastic deformation. *Izvestiya VolGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2005, no. 3, pp. 52–55. (In Russ.).
- [16] Kochetkov A.V., Barats F.Ya., Shashkov I.G. The review of researches of finishing strengthening processing by a method of superficial plastic deformation. *Naukovedenie*, 2013, no. 4. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/38tvn413.pdf> (in Russ.).
- [17] Korobeynikov V.V. Methods of machining of details surfacing plastic deformation. *Trudy RGUPS*, 2016, no. 3, pp. 77–81. (In Russ.).
- [18] Ngo K.K., Zaydes S.A. Influence of local surface plastic deformation kinematics on stress-strain state in the deformation zone. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 3, pp. 39–47, doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-39-47> (in Russ.).
- [19] Zaydes S.A., Kho M.K. Pendulum surface plastic deformation of cylindrical blanks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2022, no. 5, pp. 344–353, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-344-353> (in Russ.).
- [20] Zaydes S.A., Nguen Kh.Kh. Influence of kinematics of a toroidal roller on the stress-strain state under surface plastic deformation. *Metalloobrabotka*, 2022, no. 2, pp. 40–48, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2022.2.40> (in Russ.).
- [21] Zaydes S.A., Nguen Kh.Kh. *Sposob poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya naruzhnykh poverkhnostey tel vrashcheniya* [Method for surface plastic deformation of the outer surfaces of bodies of rotation]. Patent RU 2758713. Appl., 14.01.2021, publ. 01.11.2021. (In Russ.).
- [22] Zaydes S.A., Nguen Kh.Kh. Influence of the toroidal cutter kinematics on elastic state of the machine parts surface bed. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2022, no. 6, pp. 12–21, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-6-12-21> (in Russ.).
- [23] Zaydes S.A., Nguen Kh.Kh. The influence of the main parameters of the reversible surface plastic deformation on the stress-strain state of cylindrical parts. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2022, no. 3, pp. 7–15. (In Russ.).
- [24] Vinciguerra V., Malgioglio G.L., Landi A. Modelling the elastic energy of a bifurcated wafer: a benchmark of the analytical solution vs. the ANSYS finite element analysis. *Compos. Struct.*, 2022, vol. 281, art. 114996, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114996>
- [25] Bakov K.A. *ANSYS. Spravochnik polzovatelya* [ANSYS user guide]. Moscow, DMK Press Publ., 2005. 650 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 19.12.2022

Информация об авторах

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

НГУЕН Хыу Хай — аспирант кафедры «Материаловедение, сварочные и аддитивные технологии». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: nquan6799@gmail.com).

Information about the authors

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

NGUYEN Huu Hai — Postgraduate, Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: nquan6799@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Оценка геометрических параметров отпечатка и давления в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой при реверсивном поверхностном пластическом деформировании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 3, с. 34–45, doi: 10.18698/0536-1044-2023-3-34-45

Please cite this article in English as:

Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Evaluation of the Imprint Geometric Parameters and Pressure in the Working Tool Contact Zone under the Reversible Surface Plastic Deformation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 3, pp. 34–45, doi: 10.18698/0536-1044-2023-3-34-45



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие
под редакцией А.Н. Морозова

«Физические основы механики. Колебания и волны. Элементы теории относительности. Модуль 1»

Авторы: Д.К. Веретимус, Н.К. Веретимус

Пособие предназначено для самостоятельного изучения студентами дисциплины «Физика». Рассмотрены теоретические основы следующих разделов физики: кинематика, динамика, механические колебания, волны, специальная теория относительности. Приведены базовые понятия и определения. В каждом разделе даны примеры решения тематических задач и задачи для самостоятельного решения.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана всех специальностей.

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; <https://bmstu.press>