

УДК 621.787.4

DOI: 10.30987/article_5ca3030a5bfe86.87759559

С.А. Зайдес¹, д.т.н.,
И.Н. Бобровский², к.т.н.,
Фам Ван Ан¹, аспирант

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83;

²Тольяттинский государственный университет
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14)

E-mail: zsa@istu.edu; bobzi@yandex.ru;
vananhtdh0202@gmail.com

Влияние кинематики локального деформирования на напряженное состояние поверхностного слоя

Разработана кинематика движения деформирующего инструмента для изменения напряженно-деформированного состояния в очаге упругопластической деформации и повышения остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании. Приведены результаты компьютерного моделирования процесса нагружения при разных условиях контакта деформирующего инструмента с деталью, дающие возможность повышения эффективности нового способа отделочно-упрочняющей обработки – орбитального поверхностного пластического деформирования.

Ключевые слова: кинематика; остаточное напряжение; моделирование; эффективность; процесс нагружения; орбитальное движение.

S.A. Zaides¹, Dr.Sc. Tech.,
I.N. Bobrovsky², Can.Sc.Tech.,
Fam Van An¹, Post graduate student

¹Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov Str., Irkutsk 664074;

²Togliatti State University, 14, Belorusskaya Str., Togliatti 445020)

Impact of local deformation kinematics upon stressed state of surface layer

A kinematics of a deforming tool motion for stress-strain state changes in the point of an elastic-plastic deformation and residual stresses increase at surface plastic deformation is developed. The results of a loading process computer simulation under different conditions of a deforming tool contact with a part which give a possibility to increase the effectiveness of a new method of the finishing-strengthening of orbital surface plastic deformation are shown.

Keywords: kinematics; residual stress; modeling; effectiveness; loading process; orbital motion.

Введение

При создании изделий машиностроения специалисты решают две важные проблемы. С одной стороны, изделие должно быть надежным, а с другой – экономичным. Выбор

конструкционных материалов является важнейшей задачей при изготовлении деталей машин. И здесь вопросы качества металла и его стоимости находятся в явном противоречии. Перед технологами всегда стоит актуальная задача – как повысить качество

изделия с минимальными материальными затратами? Важнейшим направлением решения этой проблемы является повышение несущей способности поверхностного слоя деталей машин, от которой зависит работоспособность всего изделия.

Одним из доступных и экономичных методов повышения качества поверхностного слоя является отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием [1 – 4]. Деформационные методы упрочнения нашли широкое распространение в металлообрабатывающей промышленности.

Обкатывание шариком, роликом, диском и другими рабочими инструментами снижает шероховатость поверхностного слоя, повышает его прочность, формирует остаточные напряжения сжатия. В результате применения процессов ППД повышаются износостойкость, контактная выносливость, и в итоге долговечность изделий возрастает в несколько раз [5, 6, 7].

Важнейшим параметром качества поверхностного слоя являются остаточные напряжения сжатия, которые обычно формируются при ППД [8]. В работах [6, 9, 10] установлено, что остаточные напряжения сжатия оказывают существенное влияние на повышение усталостной прочности и износостойкости металлов и сплавов. С другой стороны, например, при обработке металлов давлением остаточные напряжения иногда достигают такой величины, что могут привести к разрушению металлических изделий [11].

При отделочно-упрочняющей обработке ППД, в отличие от обработки металлов давлением, остаточные напряжения в поверхностных слоях достигают относительно небольших значений и распространяются на небольшую глубину. Причина этого заключается в том, что деформируется относительно небольшой объем материала, степень неравномерности деформаций при этом невысокая, а, следовательно, формируются и небольшие по величине остаточные напряжения.

В связи с изложенным возникает вопрос – можно ли повысить величину остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей машин при ППД?

Обзор существующих методов ППД достаточно подробно представлен в работе [6]. Это обкатка шариком, роликом, алмазным выплаживателем, вибрационная, ультразвуковая и ударная обработки и многие другие.

Анализируя известные методы ППД, можно сделать следующие выводы:

1. Существует два основных вида пласти-

ческого деформирования поверхностного слоя – это обработка скольжением рабочим инструментом и обработка качением [10].

2. Для реализации деформационного воздействия рабочего инструмента используют различные источники энергии: статические, динамические, ультразвуковые, центробежные и другие [6, 10].

3. Глубина внедрения рабочего инструмента для большинства методов ППД не превышает 0,1...0,3 мм, что не позволяет достичь значительной неравномерности пластической деформации, а, следовательно, и больших значений остаточных напряжений сжатия.

4. Кинематика деформирующего инструмента характеризуется в основном двумя направлениями – вдоль направления действия внешней нагрузки и перпендикулярно ему.

В отличие от традиционных схем обработки [6] в настоящее время разработаны процессы ППД, основанные на новой кинематике деформирующего инструмента. Так, в работе [13] предложено изменить ось вращения цилиндрического ролика, которая проходит через центр диаметальной плоскости. Новая кинематика движения рабочего инструмента позволяет изменить напряженное состояние в очаге деформации и повысить степень упрочнения. Известен ряд работ [10, 14] по исследованию влияния кинематики деформирующего инструмента на качество упрочненных деталей, где авторы предлагают изменить направление вращения рабочего инструмента.

В физике металлов известна кривая, показывающая влияние количества дислокаций на прочность металла [15]. Накопление дислокаций в определенных пределах служит эффективным средством повышения прочности конструкционного материала. Интенсивность формирования дислокаций в существенной мере зависит от кинематики деформационного процесса, которую формирует рабочий инструмент. Можно с уверенностью утверждать, что чем сложнее кинематика процесса, тем эффективнее формируются и развиваются дислокационные процессы в упрочняемом материале.

В основе возникновения остаточных напряжений обычно лежат необратимые объемные изменения материала [8]. Следовательно, для того чтобы повысить величину остаточных напряжений необходимо увеличить объем деформированного материала в очаге деформации.

Целью данной работы является разработка кинематики рабочего инструмента для изме-

нения напряженно-деформированного состояния в очаге упругопластической деформации и повышения остаточных напряжений сжатия при ППД.

Схемы поверхностного пластического деформирования

Рассмотрим рис. 1, где представлены схемы нагружения деформирующим инструментом. Схема на рис. 1, а характеризует одноразовое локальное нагружение шаром. Схема на рис. 1, б представляет собой процесс упрочнения, основанный на вращении рабочего инстру-

мента в процессе деформирования. Схема на рис. 1, в представляет собой орбитальное воздействие деформирующего инструмента, которое осуществляется за счет вращения нагруженного индентора относительно вертикальной оси. При этом траектория вращения осевой линии индентора образует в пространстве коническую поверхность с углом при вершине α . Новая кинематика рабочего инструмента, на наш взгляд, должна способствовать повышению интенсивности напряжений в зоне нагружения, так как каждый очаг деформации дополнительно обкатывается шаром по сферической поверхности лунки.

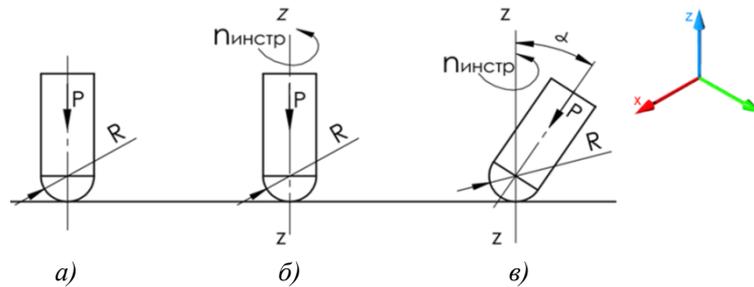


Рис. 1. Схемы нагружения при различных условиях контакта с обработанной поверхностью:

а – индентор без вращения; б – индентор с вращением относительно z-z;

в – наклонный индентор с вращением относительно z-z под углом α

Моделирование процессов нагружения

Анализ напряженно-деформированного состояния деформируемого металла выполнен с использованием CAD/CAE системы ANSYS. Влияние кинематики деформирующего инструмента на напряженное состояние в очаге деформации и остаточных напряжений после разгрузки исследовали на пластинах, которые нагружали индентором, имеющим стержневую форму со сферическим наконечником.

Моделирование механики процесса локального нагружения проведено при неизменных параметрах материала заготовки: 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, модулем упругости E и модулем упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа.

В соответствии с принятой постановкой моделирования процесса упрочняющей обработки ППД создавалась конечно-элементная модель, состоящая из обрабатываемой заготовки и индентора. Заготовка моделировалась как упругопластическое, а индентор – как аб-

солютно жесткое тело, тепловое явление не учитывалось, коэффициент трения в зоне контакта без вращения принят $\eta = 0,2$, а с вращением $n_{инст} = 500 \text{ мин}^{-1}$ принят $\eta = 0,1$; наклонный угол индентора $\alpha = 15^\circ$.

Данные для проведения исследования: индентор представляет собой полушар из сплава ВК8 радиусом 5 мм; заготовка (образец) из стали 45 размером 20x20x20 мм; глубина внедрения полушара 0,2 мм.

Результаты компьютерного моделирования

На рис. 2 представлены для примера фрагменты программы, содержащие результаты определения интенсивности временных и остаточных напряжений в зависимости от способа нагружения образца.

Анализ распределения интенсивности полей временных напряжений (рис. 2, а) показывает, что при статическом внедрении индентора (см. рис. 1, а) поле напряжений действуют в большем объеме образца, чем при вращении индентора, но по абсолютной величине при статическом нагружении максимальные напряжения ниже, чем при вращении индентора.

Поля распределения интенсивности оста

точных напряжений имеют более сложную картинку по сравнению с временными напряжениями. Установлено, что при более слож-

ной кинематике рабочего инструмента, интенсивность остаточных напряжений сжатия возрастает (рис. 2, а).

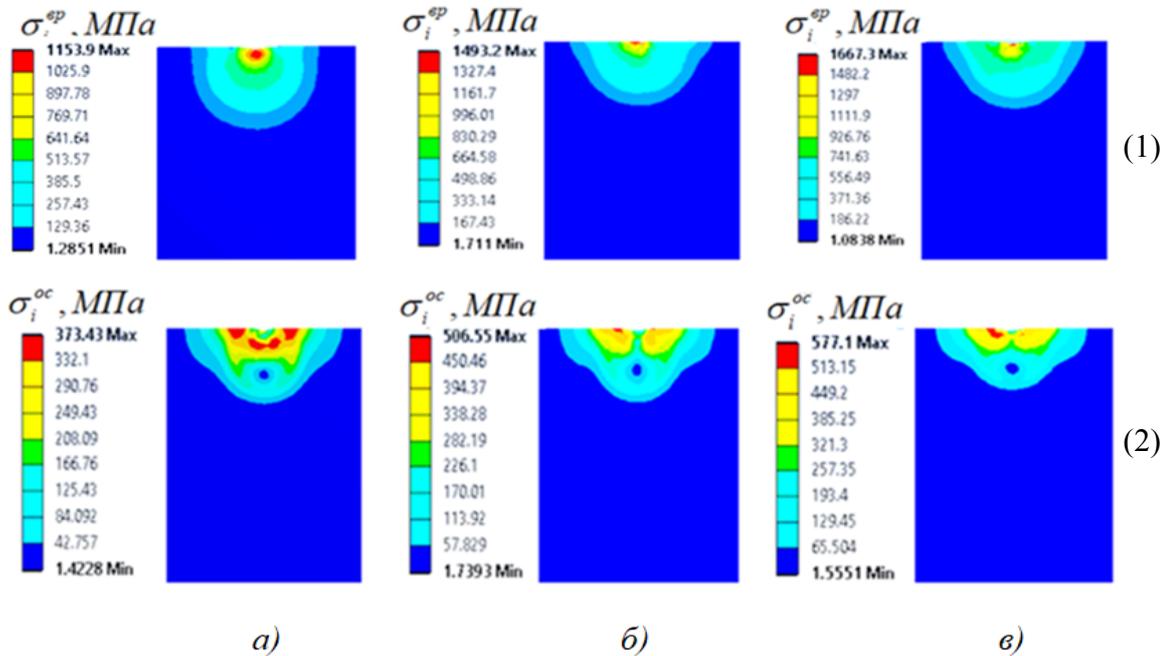


Рис. 2. Примеры распределения полей интенсивности временных (1) и остаточных (2) напряжений при различных схемах нагружения деформирующего инструмента (см. рис. 1)

На рис. 3 представлено изменение интенсивности напряжений и главных компонент тензора напряжений во времени при разных схемах нагружения деформирующего инструмента.

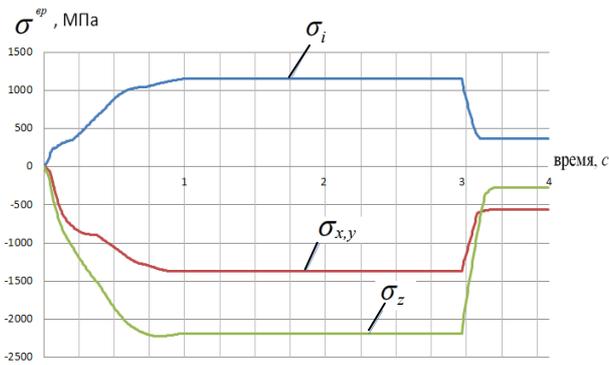
Простое внедрение индентора (см. рис. 1, а) в поверхность образца обеспечивает упруго-пластическое деформирование металла, характерное поведению металла при испытании на растяжение. Сначала происходит упругая деформация, затем упруго пластическая, которая значительно больше, чем при испытании на растяжение. Далее поддерживается во времени чисто пластическая деформация, которая проходит при постоянном напряжении. После снятия нагрузки с индентора процесс разгрузки происходит относительно быстро и в металле формируются остаточные напряжения (рис. 3, а).

При нагружении вращающегося индентора (см. рис. 1, б), кривая деформирования похожа на кривую, полученную при внедрении индентора без вращения. Однако кривая пластического деформирования имеет более сложный характер, который объясняется тем, что при вращении индентора за счет дополнительных сил трения скольжения происходят более сложные деформационные процессы в

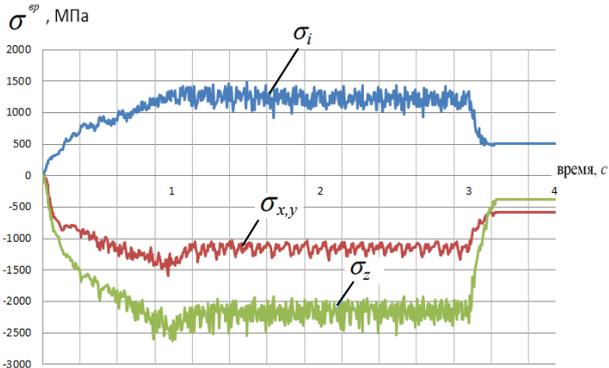
поверхностных слоях, что приводит к росту напряженного состояния в очаге упруго-пластической деформации (см. рис. 3, б).

Аналогично, при орбитальном вращении индентора (см. рис. 1, в), кривая деформирования похожа на кривую, полученную при внедрении вращающегося индентора вокруг своей оси. Однако орбитальное вращение индентора характеризуется более пульсирующей кривой, которая объясняется тем, что при внедрении инструмента с одновременным вращением, которое образует пространственной конус приводит к «перемешиванию» структуры поверхностного слоя материала. В результате этого материал нагруженного тела находится в условиях сложного напряженного состояния и испытывает пластическую деформацию с накоплением большого числа искажений (см. рис. 3, в). Это приводит к росту интенсивности напряжений в очаге деформации по сравнению с напряжениями при статическом нагружении (см. рис. 3, а).

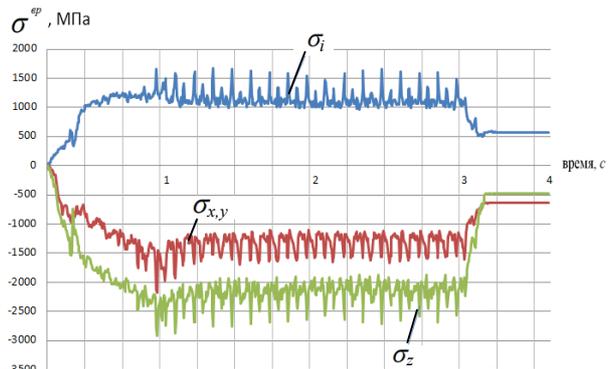
Анализируя компоненты тензора напряжений в очаге деформации (см. рис. 3), можно отметить, что напряжения σ_x и σ_y , действующие в радиальном направлении в очаге деформации равны между собой. Характер их действия аналогичен рассмотренному выше.



а)



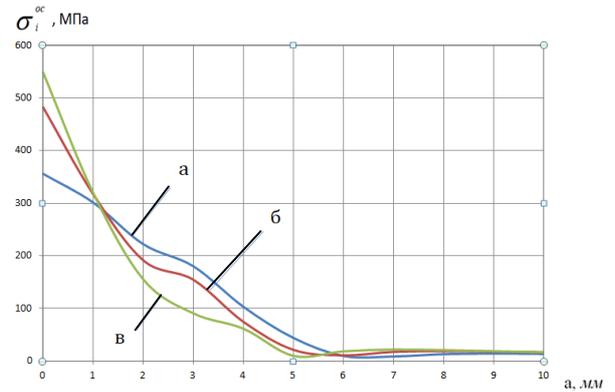
б)



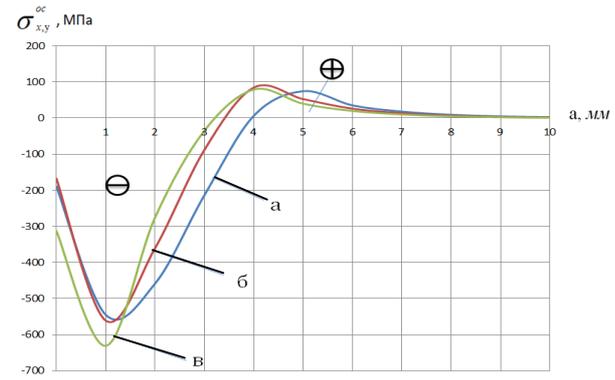
в)

Рис. 3. Изменение во времени интенсивности и компонентов тензора напряжений $\sigma_i^{вр}$, $\sigma_{x,y}^{вр}$, $\sigma_z^{вр}$ при различных схемах нагружения деформирующего инструмента (см. рис. 1)

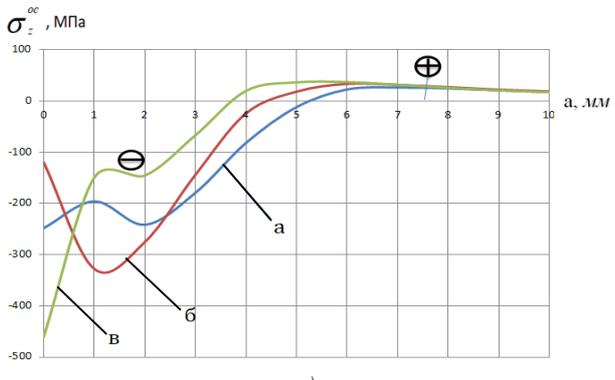
Анализ остаточных напряжений после разгрузки образца показал, что чем сложнее кинематика деформирующего инструмента, тем большую величину достигают остаточное напряжение сжатия. Это относится как к компонентам тензора остаточных напряжений, так и к интенсивности остаточных напряжений. Следует отметить, что во всех случаях нагружения в поверхностных слоях образца возникают остаточные напряжения сжатия, которые распространяются на глубине 4...5 мм (рис. 4).



а)



б)



в)

Рис. 4. Распределение интенсивности и компоненты тензора остаточных напряжений $\sigma_i^{ос}$, $\sigma_{x,y}^{ос}$, $\sigma_z^{ос}$ по глубине образца при различных схемах нагружения деформирующего инструмента (см. рис. 1)

Для удобства сравнения и анализа результатов расчета напряженного состояния в очаге деформации и в упрочненных образцах данные представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, способы нагружения образца значительно влияют на изменение величин временных и остаточных напряжений. Качество упрочнения увеличивается за счет интенсификации напряжений в зоне деформации в следующей последовательности: упрочнение без вращения, упрочнение с вращением

относительно $z-z$, упрочнение с вращением относительно $z-z$ под углом α . Выявлено, что кинематика деформирующего инструмента

влияет на величины временных и остаточных напряжений по всем осям координат Ox , Oy , Oz .

1. Значения компонентов максимальных временных и остаточных напряжений при различных схемах нагружения деформирующего инструмента

Схема нагружения	$\sigma_i^{вр}$	$\sigma_{x,y}^{вр}$	$\sigma_z^{вр}$	$\sigma_i^{ос}$	$\sigma_{x,y}^{ос}$	$\sigma_z^{ос}$
	МПа					
Индентор без вращения	-1154	-1373	-2227	-373	-562	-278
Индентор с вращением относительно $z-z$	-1493	-1589	-2627	-507	-561	-382
Наклонный индентор с вращением относительно $z-z$ под углом α	-1667	-2169	-2919	-577	-631	-480

Выводы:

1. Результаты компьютерного моделирования и расчеты напряженного состояния при локальном воздействии рабочего инструмента позволили обосновать эффективность нового способа отделочно-упрочняющей обработки – орбитального поверхностного пластического деформирования.

2. Исследование кинематики локального нагружения показало, что имеются новые возможности как для изменения напряженного состояния в очаге упругопластической деформации, так и остаточных напряжений в упрочненных деталях.

3. Повышение интенсивности напряжений в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой может быть эффективно использовано для отделочно-упрочняющей обработки маложестких изделий типа валов и осей. Возможность повышать рабочие напряжения позволяет уменьшить радиальный натяг, и тем самым снизить искривление деталей при обработке.

4. Орбитальное поверхностное пластическое деформирование позволяет повышать величину остаточных напряжений сжатия в поверхностных слоях, а, следовательно, увеличивать работоспособность деталей машин и механизмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Горохов, В.А.** Обработка деталей пластическим деформированием. – Киев: Техника, 1978. –191 с.
 2. **Зайдес, С.А, Нго Као Кыонг** Новые технологические возможности отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – №3(69). – С. 25-30.
 3. **Гаврилов, С.А.** Совершенствование процесса поверхностного пластического деформирования на основе

применения металлоплакирующих смазочных материалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 4. – С. 33-39.

4. **Матлин, М.М., Лебский, С.Л.** Прогнозирование глубины наклепанного слоя при комбинированном упрочнении // Вестник машиностроения. – 2001. – №4. – С. 56-58.

5. **Суслов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

6. **Одинцов, Л.Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

7. **Блюменштейн, В.Ю., Смелянский, В.М.** Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение, 2007. – 399 с.

8. **Смелянский, В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.

9. **Лебедев, В.А.** Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки/ под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 403 с.

10. **Технология** и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник: в 2-х т. Т.1 / под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – 480 с.

11. **Зайдес, С.А.** Деформирующая обработка валов: монография / С.А. Зайдес, В.Н. Емельянов, М.Е. Попов, Е.Ю. Кропоткина, А.С. Бубнов // под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 452 с.

12. **Нго К. К., Зайдес, С.А.** Влияние кинематики локального поверхностного пластического деформирования на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации // Вестник ИрГТУ. – 2017. – Т.21. № 3. – С. 39–47.

13. **Зайдес, С.А., Нго Као Кыонг, Бубнов, А.С.** Стенное деформирование при обработке металлов: Монография. Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing – Германия, 2016. – 231 с.

14. Маталин, А.А., Ильященко, А.А. Влияние направление выглаживания и раскатывания на шероховатость и износостойкость обработанных поверхностей // Вестник машиностроения. – 1975. – № 3. – С. 74-75

15. Зуев, Л.Б., Данилов, В.И. Физические основы прочности материалов. – М.: Изд-во «Интеллект», 2013. – 373 с.

REFERENCES

1. Gorokhov, V.A. *Parts Processing with Plastic Deformation*. Kiev: Engineering, 1978. – pp. 191.

2. Zaides, S.A., Ngo Kao Kyong. New technological potentialities of finishing-strengthening with surface plastic deformation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.3(69). – pp. 25-30.

3. Gavrilov, S.A. Surface plastic deformation process updating based on metal cladding lubricants application // *Fric-tion and Lubrication in Machines and Mechanisms*. – 2013. – No.4. – pp. 33-39.

4. Matlin, M.M., Lebsky, S.L. Prediction of cold-worked layer depth at combined strengthening // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2001. – No.4. – pp. 56-58.

5. Suslov, A.G. *Parameter Technological Support of Parts Surface Layer State*. – М.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 208.

6. Odintsov, L.G. *Parts Strengthening and Finishing with Plastic Deformation*: reference book. – М.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 328.

7. Blyumenstein, V.Yu., Smelyansky, V.M. *Technological Succession Mechanics at Stages of Machinery Processing and Operation*. – М.: Mechanical Engineering, 2007. – pp. 399.

8. Smelyansky, V.M. *Mechanics of Parts Strengthening with Surface Plastic Deformation*. М.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 300.

9. Ltbtddev V.A. *Efficient Technologies of Surface Plastic Deformation and Combined Processing* / under the editorship of A.V. Kirichek. – М.: “Spectrum” Publishing House, 2014. – pp. 403.

10. *Technology and Tools of Parts Finishing-Strengthening with Surface Plastic Deformation*: reference book: in 2 Vol. Vol.1 / under the general editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering, 2014. – pp. 480.

11. Zaides, S.A. *Shaft Deformation Processing*: monograph / S.A. Zaides, V.N. Yemeliyanov, M.E. Popov, E.Yu. Kropotkina, A.S. Bubnov // under the editorship of S.A. Zaides. – Irkutsk: IrSTU Publishers, 2013. – pp. 452.

12. Ngo K.K., Zaides, S.A. Impact of local plastic deformation kinematics upon stress-strain state in deformation point // *Bulletin of IrSTU*. – 2017. – Vol.21. No.3. – pp. 39-47.

13. Zaides, S.A., Ngo Kao Kyong, Bubnov, A.S. *Tight Deformation at Metal Processing*: monograph. LAP LAMBERT Academic Publishing Germany, 2016. – pp. 231.

14. Matalin, A.A., Iliyashchenko, A.A. Impact of smoothing and flattening direction upon roughness and wear-resistance of surfaces worked // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 1975. – No.3. – pp. 74-75.

15. Zuev, L.B., Danilov, V.I. *Physical Fundamentals of Material Strength*. – М.: “Intellect” Publishers, 2013. – pp. 373.

Рецензент д.т.н. В.П. Кольцов

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научноёмкие технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru