

УДК 621.7.011
DOI: 10.12737/24961

**С.А. Зайдес, д.т.н.,
Нго Као Кыонг, аспирант**
(Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83)
E-mail: cuong.istu@gmail.com

Новые технологические возможности отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием

Рассмотрено влияние некоторых схем деформирования на напряженное состояние: обкатывание качением, обкатывание скольжением, обкатывание одним и двумя роликами с вращением относительно диаметральной оси. Выявлено, что основными факторами, оказывающими влияние 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 деформации; напряженное состояние; пластическое деформирование; упрочнение; индентор.

**S.A. Zaides, D. Eng.,
Ngo Cao Cuong, Post graduate student**
(Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov Str., 664074, Irkutsk, Russia)

New technological potentialities of finish-strengthening by surface plastic deformation

The paper reports the results of the strengthening simulation process. A new kinematics of deforming rollers ensuring a surface plastic deformation of shafts of low rigidity was considered. On the basis of the theory of low elasto-plastic deformations and a method of finite elements there were formed simulators of a strengthening process allowing the definition of a stressed state in a sample depending on the form and kinematics of an indenter. With the aid of ANSYSWB software there was considered the impact of some circuits of deformation upon a stressed state: running-in by rolling, running-in by slip, running-in by one and two rollers with the rotation with regard to a diametrical axis. On the basis of simulation results it was revealed that the basic factors affecting a stress-strain state of parts are geometry, a form, a mutual location of elements of a tool deformed and their kinematics with regard to a part worked.

Keywords: finite-element modeling; deformation intensification; stressed state; plastic deformation; strengthening; indenter.

Для повышения долговечности различных деталей в промышленности широко применяют технологии поверхностного пластического деформирования (ППД). Отделочно-упрочняющие методы обработки ППД просты в реализации, экономичны, производительны, обеспечивают формирование низкой шероховатости, заданной глубины и степени упрочнения, остаточных напряжений сжатия в поверхностных слоях, мелкозернистой структуры и других

показателей качества поверхностного слоя обработанных деталей [1 – 4].

Поверхностное пластическое деформирование традиционно осуществляется локальным деформирующим инструментом (шарик, ролик, диск, алмазный индентор и др.). Пластическое локальное воздействие позволяет выполнять отделочно-упрочняющую обработку разнообразных деталей сложных и простых форм.

Однако при поверхностном пластическом

деформировании деталей малой жесткости (тонкостенные, длинномерные детали) возможности локальных методов упрочнения ограничены. Это связано с малой изгибной жесткостью заготовки, вибрациями в механической системе, сложностью достижения заданного качества деталей, 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 изделий [5].

С учетом вышеизложенного возникает вопрос о необходимости интенсификации напряженно-деформированного состояния в очаге деформации технологических способов поверхностного пластического деформирования для достижения высоких качественных показателей при обработке маложестких деталей.

Целью данной работы является разработка новых технологических схем ППД, обеспечивающих интенсификацию напряженного состояния в очаге упругопластической деформации.

Физические особенности деформационного упрочнения

Согласно современной дислокационной теории основные механизмы упрочнения, обеспечивающие повышение напряжения пластического течения, можно классифицировать на основе геометрических размеров «препятствий», тормозящих движение дислокаций (элементами субструктуры, границами зерен, растворенными атомами, дислокациями, дисперсными частицами) [6].

Наиболее эффективное упрочнение сталей и сплавов может быть реализовано путем целенаправленных технологических воздействий на структуру металлов для увеличения плотности дислокаций и создания дислокационной субструктуры для увеличения сопротивления сдвигу.

Деформационное упрочнение при пластической деформации возникает из-за увеличения числа дефектов кристаллического строения, затруднения движения дислокаций, когда исчерпываются возможности скольжения (двойникования) в данных плоскостях. При этом происходит повышение их плотности и увеличение кривизны дислокаций, образуются точечные дефекты и барьеры типа Ломера–Коттрелла, фрагменты и пересечения плоскостей скольжения, ступеньки на дислокациях, узлы и другие сложные дислокационные построения [7, 8].

Следовательно, постепенно увеличивающаяся искаженность решетки повышает сопротивление деформации и уменьшает пластичность. Наибольшее значение имеет увеличение плотности дислокаций, так как возникающее при этом между ними взаимодействие тормозит дальнейшее их перемещение.

Таким образом, пути 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.

Интенсификация напряженного состояния может быть повышена, если будет усилено деформационное искажение зерен материала. Отсюда вытекает технологическая задача: необходимо создать такую конструкцию и кинематику рабочего инструмента, которые бы при поверхностном пластическом деформировании усиливали искажение структуры материала.

Схемы поверхностного пластического деформирования

В практике ППД известны и широко используют две схемы упрочняющей обработки: упрочнение по схеме качения рабочего инструмента (рис. 1, а) и упрочнение по схеме скольжения (рис. 1, б). Последнюю значительно реже используют на практике, так как трение скольжения в зоне контакта приводит к большим тепловым процессам, а сам инструмент интенсивно изнашивается. Однако если оценить эти две схемы упрочнения с точки зрения механики процесса и возможности деформационного искажения микроструктуры, то обработка по схеме скольжения должна быть более эффективной.

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

Если совместить два ролика вместе и вращать их также относительно оси $Y-Y$ (рис. 1, z), то эффективность обработки должна быть еще выше, так как в процессе деформирования участвует не два, а четыре очага деформации на каждый оборот ролика.

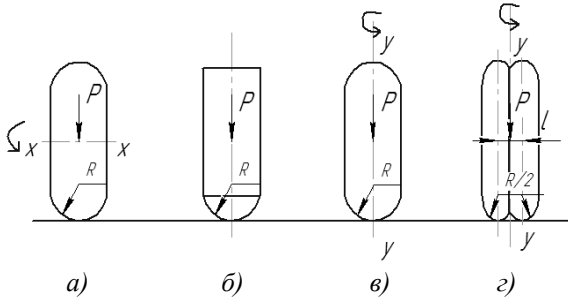


Рис. 1. Схемы нагружения при различных условиях контакта с обрабатываемой поверхностью ($X-X$, $Y-Y$ оси вращения)

Конечно-элементное моделирование процесса

Для анализа напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочнении различными методами ППД и для исследования формирования остаточных напряжений успешно применяется компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Одной из универсальных и широко используемых программ, реализующих МКЭ, является ANSYS. Универсальность ANSYS позволяет решать линейные и нелинейные стационарные и нестационарные пространственные задачи механики деформируемого твердого тела и механики конструкций.

Моделирование упрочняющей обработки и процессов, протекающих в поверхностном слое деталей при ППД, осложнено рядом факторов, не учитываемых в аналитических расчетах остаточных деформаций и при моделировании технологических остаточных деформаций в статике. Фактор времени является наиболее значимым.

Формирование поверхностного слоя, упрочненного ППД, в отличие от статического моделирования, производится с помощью моделирования реального воздействия деформирующих элементов на материал модели. Динамическое моделирование упрочняющей обработки позволяет исследовать эффект упрочнения и производить полный цикл исследований остаточных напряжений и остаточных деформаций [9].

Формирование геометрии расчетной области

в программе последовательно проводили согласно схемам нагружения плоской поверхности образца жестким роликом (см. рис. 1). Упрочняющая обработка в программе представляет собой реальное перемещение упрочняющих тел во времени относительно упрочняемого образца. Траектория движения упрочняющих тел воспроизводит режим работы упрочняемой детали.

Приняты следующие режимы обработки: глубина внедрения инструмента $t = 0,1$ мм; частота вращения инструмента $n = 300$ об/мин; подача инструмента $s = 0,2$ мм/об; коэффициент трения в зоне контакта $f = 0,2$.

Характеристики образца: форма поверхности – плоская; 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 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 новое перспективное направление синтеза методов и схем упрочнения, обеспечивающее формирование новых комплексов свойств поверхности и поверхностного слоя деталей за счет комбинирования истории нагружения при учете накопления повреждаемости на каждом этапе упругопластического деформирования.

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

Результаты моделирования

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

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

На рис. 2 показано влияние схем деформирования на максимальное эквивалентное остаточное напряжение.

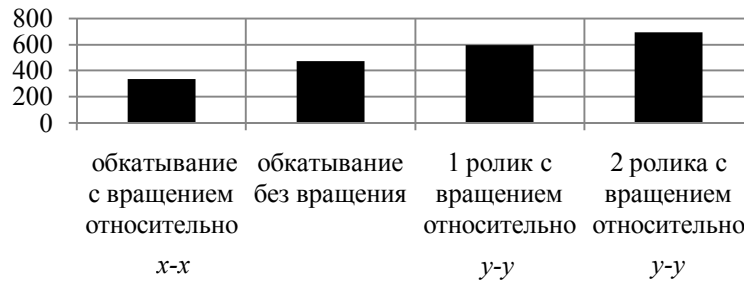


Рис. 2. Влияние схем деформирования на максимальные значения эквивалентных остаточных напряжений

В таблице представлены компоненты максимальных остаточных напряжений образца.

Влияние схем деформирования на компоненты максимальных остаточных напряжений образца

Схемы обработки	σ_x , МПа	σ_y , МПа	σ_z , МПа
Обкатывание с вращением относительно X-X	-335	-356	-79
Обкатывание без вращения	-352	-365	-86
Один ролик с вращением относительно Y-Y	-364	-397	-110
Два ролика с вращением относительно Y-Y	-746	-744	-145

При ППД качением (простое обкатывание) происходит минимальное искажение структуры. При условии ППД скольжением возникает большое трение, которое приводит к повышению интенсивности напряжения в зоне деформации. При ППД с вращением ролика относительно своей диаметральной оси Y-Y за счет разных размеров очагов деформации напряжения усиливаются. Эффективный результат получен при ППД с вращением двух роликов относительно оси Y-Y. В результате описанной 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 является расстояние между очагами пластических отпечатков, которое должно быть оптимальным. Первый деформирующий элемент полностью работает в зоне очага деформации, создаваемой вторым деформирующим элементом, происходит перекрытие и «перемешивание» двух очагов деформации и их слияние в один комплексный очаг деформации.

Существует оптимальное расстояние между

вершинами роликов (в нашем случае $l = 1,5$ мм), при котором обеспечивается получение максимальных напряжений (рис. 3). При $l > 1,5$ мм очаги деформации не влияют друг на друга, и можно считать, что двухрадиусный ролик работает как обычный ролик.

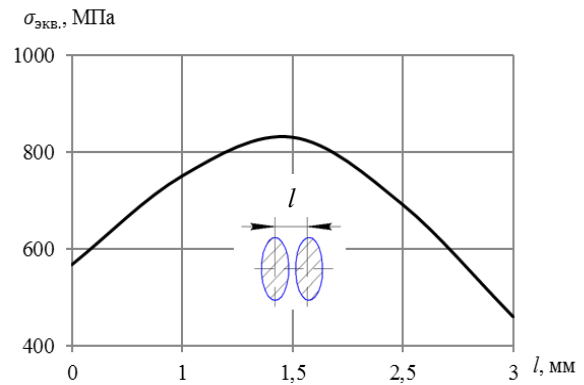


Рис. 3. Влияние расстояния между центрами двух роликов l на максимальные значения эквивалентных остаточных напряжений образца

На рис. 4 показано влияние глубины внедрения двухрадиусного ролика на максимальное эквивалентное напряжение и компонент максимального остаточного напряжения образца. Аналогично традиционным методам обработки ППД, при росте величины внедрения инструмента в зоне контакта, степени деформации и плотности дислокаций до определенного предела происходит исчерпание пластических свойств материала (перенаклеп), приводящий к разрушению поверхностного слоя металла и снижению прочности.

На рис. 5 показано влияние величины подачи двухрадиусного ролика на максимальные значения эквивалентных остаточных напряжений и компонент максимальных остаточных напряжений образца. Уменьшение подачи приводит к местному увеличению деформации обкатываемой поверхности. Подача инструмента при оптимальных режимах обработки практически не

влияет на уровень остаточных напряжений (в нашем случае 0,2...0,4 мм). Увеличение подачи до значения большего, чем допустимое, приво-

дит к уменьшению остаточного напряжения из-за неравномерного перекрытия очага деформации.

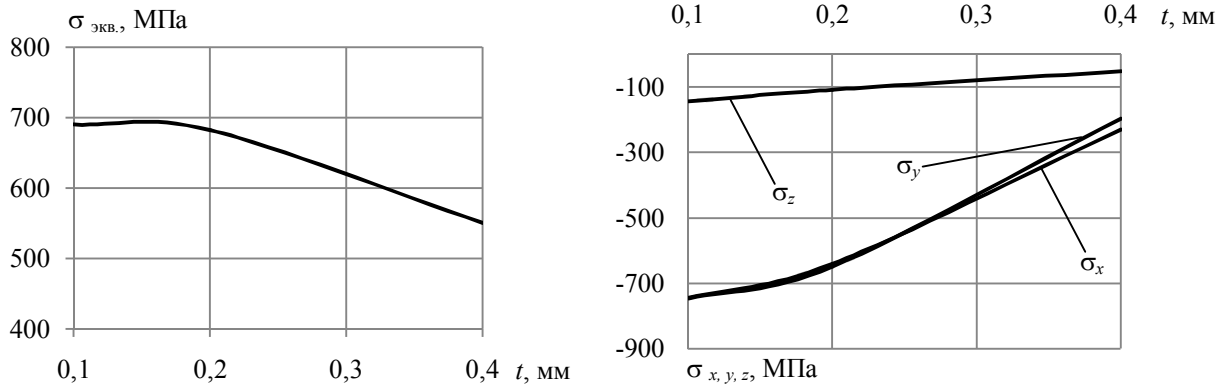


Рис. 4. Влияние глубины внедрения двухрадиусного ролика на максимальные значения эквивалентных остаточных напряжений и компонент максимальных остаточных напряжений образца

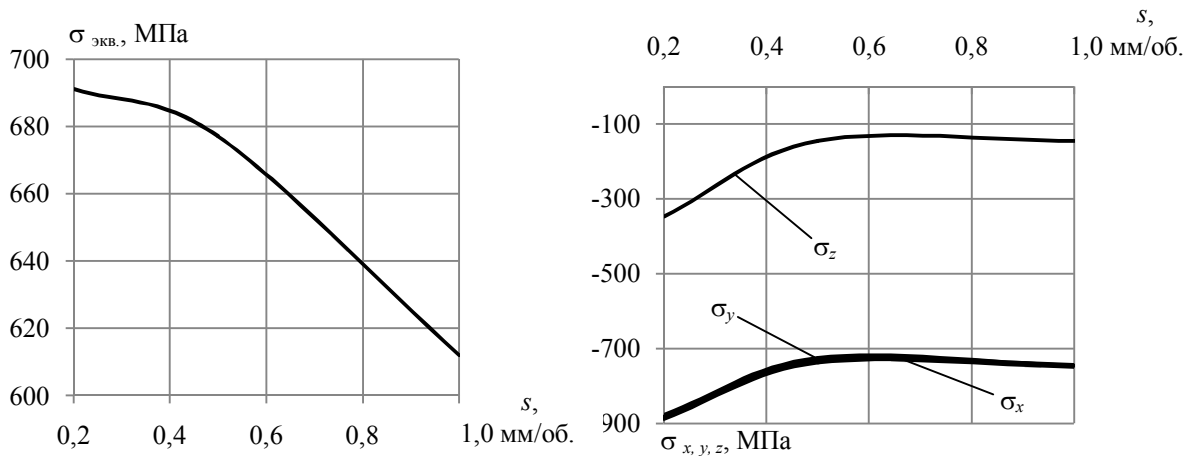


Рис. 5. Влияние величины подачи двухрадиусного ролика на максимальные значения эквивалентных напряжений и компонент максимальных остаточных напряжений образца

На рис. 6 показано влияние частоты вращения двухрадиусного ролика на максимальные значения остаточных напряжений образца. По мере повышения частоты вращения инструмента уменьшается время протекания пластического деформирования, следовательно, выше напряжения, при которых происходит переход от упругого деформирования к пластическому.

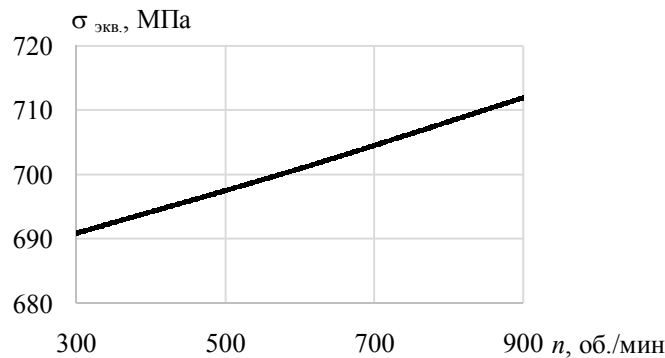


Рис. 6. Влияние частоты вращения двухрадиусного ролика на максимальные значения эквивалентных остаточных напряжений образца

Выводы

1. Представленные исследования раскрывают новые технологические возможности поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин. Предложен способ, который отличается кинематикой процесса, формой и расположением деформирующего элемента. С помощью разработанной схемы упрочнения возможно достижение высокой степени упрочнения при поверхностном пластическом деформировании по сравнению с традиционными способами.

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

3. Проведенные исследования показывают, что описанная выше конструкция профиля рабочей части обкатного ролика позволяет накапливать большие значения деформаций и увеличить максимально достижимые значения эквивалентных остаточных напряжений в 1,2–2 раза. Установлены расстояние между центрами роликов, величина внедрения, подача и частота вращения, при которых формируется наибольшее значение эквивалентного остаточного напряжения (соответственно $l = 1,5$ мм; $t = 0,1 \dots 0,2$ мм; $s = 0,2$ мм/об; $n = 900$ об/мин).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Одинцов, Л.Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
2. **Зайдес, С.А., Забродин, В.А., Мураткин, В.Г.** Поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2002. – 304 с.
3. **Суслов, А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
4. **Блюменштейн, В.Ю., Смелянский, В.М.** Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение, 2007. – 399 с.

5. **Зайдес, С.А., Исаев, А.Н.** Технологическая механика осесимметричного деформирования. – Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2007. – 432 с.

6. **Зайдес, С.А., Нго К.К.** Научное обоснование деформаций в стесненных условиях // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 9(51). – С. 39–44.

7. **Приходько, В.М., Петрова, Л.Г., Чудина, О.В.** Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. – М.: Машиностроение, 2003. – 384 с.

8. **Полухин, П.И.** Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. – М.: Metallurgy, 1983. – 352 с.

9. **Андрянов, А.И.** Прогрессивные методы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1975. – 240 с.

10. **Букатый, А.С.** Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Том 16. – № 6 (2). – С. 374 – 377.

REFERENCES

1. Odintsov, L.G. *Parts Strengthening and Finishing by Plastic Deformation*. – M.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 328.

2. Zaides, S.A., Zabrodin, V.A., Muratkin, V.G. *Surface Plastic Deformation*. – Irkutsk: Publishing House of ISTU, 2002. – pp. 304.

3. Suslov, A.G. *Quality of Surface Layer in Machine Parts*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.

4. Blumenstein, V.Yu., Smelyansky, V.M. *Technological Inheritance Mechanics at Stages of Machine Parts Machining and Operation*. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – pp. 399.

5. Zaides, S.A., Isaev, A.N. *Technological Mechanics of Axisymmetric Deformation*. – Irkutsk: Publishing House of IrSTU, 2007. – pp. 432.

6. Zaides, S.A., Ngo K.K. Scientific substantiation of deformations under cramped conditions // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 9(51). – pp. 39–44.

7. Prikhodko, V.M., Petrova, L.G., Chudina, O.V. *Metal-Physical Fundamentals in Strengthening Technologies Development*. – M.: Mechanical Engineering, 2003. – pp. 384.

8. Polukhin, P.I. *Metals and Alloys Resistance to Plastic Deformation*. – M.: Metallurgy, 1983. – pp. 352.

9. Andrianov, A.I. *Efficient Methods in Engineering Techniques*. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – pp. 240.

10. Bukaty, A.S. Accuracy increase in manufacturing critical engine parts through means of static and dynamic modeling // *Transactions of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2014. – Vol. 16. – № 6 (2). – pp. 374 – 377.

Рецензент д.т.н. В.П. Кольцов