

УДК 621.787.4

С. А. Зайдес, д-р техн. наук, проф., Хо Минь Куан, аспирант.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия

Tel: +7 904 820 0854; E-mail: [minhquanho2605@gmail.com](mailto:minhquanho2605@gmail.com)

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ СЕКТОРИАЛЬНОГО РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

*В статье представлены результаты моделирования по определению влияния секториального и рабочего радиуса деформирующего инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя цилиндрических деталей при маятниковом поверхностном пластическом деформировании, включая определение временных и остаточных напряжений, глубины пластической зоны.*

**Ключевые слова:** рабочий инструмент, временное напряжение, остаточное напряжение, рабочий инструмент, компьютерное моделирование.

S. A. Zaides, Ho Minh Quan

### INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF A SECTORIAL WORKING TOOL ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SURFACE LAYER OF CYLINDRICAL PARTS

*The article presents the results of modeling to determine the influence of the sectorial and working radius of the deforming tool on the stress-strain state of the surface layer of cylindrical parts during pendulum surface plastic deformation, including the determination of temporary and residual stresses, the depth of the plastic zone.*

**Keywords:** working tool, temporary stress, residual stress, working tool, computer simulation.

#### 1. Введение

На сегодняшний день в машиностроительном производстве поверхностное пластическое деформирование (ППД) применяется преимущественно для повышения качества и улучшения механических свойств поверхностного слоя деталей машин. После проведения отделочно-упрочняющей обработки ППД увеличивается износостойкость поверхностного слоя и стойкость к коррозионным воздействиям, усталостная прочность, повышается герметичность шероховатых поверхностей и др. [1-4]. Также производственная практика показывает, что использование ППД способствует повышению запасов прочности изделий, работающих при переменных нагрузках, в 1,5-3 раза, а срока службы – в десятки раз [5].

Однако, при упрочнении длинномерных и маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей традиционными методами обработки ППД возникают определенные ограничения по технологическим возможностям. Так как даже при низкой производительности не обеспечивается заданная точность диаметральных размеров и стабильность геометрической формы нежестких цилиндрических деталей. Также одной из существенных проблем при изготовлении таких деталей, является искажение их прямолинейной оси [6-8]. Это приводит к тому, что выпускаемая продукция не соответствует установленным требованиям и в ходе дальнейшей эксплуатации таких деталей часто возникают отказы и выходы из строя.

Таким образом, при механической обработке ППД нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей сложно получить заданное качество деталей, так как высокая радиальная нагрузка от рабочего инструмента приводит к искажению формы детали и не обеспечивает стабильность механических свойств по длине заготовки [9]. Если снизить радиальную нагрузку, то сложно получить необходимое качество поверхностного слоя при приемлемой производительности процесса.

Одним из путей решения проблемы является интенсификация напряженного состояния в очаге деформации, которая позволит получить необходимую степень упрочнения при постоянном радиальном натяге. Авторами разработана новая конструкция рабочего инструмента для ППД на основе секториального маятника, влияние которого на напряженно-деформированное состояние (НДС) поверхностного слоя необходимо оценить.

**Целью** данной работы является определение влияния секториального и рабочего радиусов деформирующего инструмента на напряженно-деформированное состояние в очаге упруго-пластической деформации и остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое.

## 2. Способ маятникового поверхностного пластического деформирования

При разработке нового способа отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием была поставлена задача по обеспечению повышенного напряженного состояния в очаге упруго-пластической деформации при постоянной величине натяга, повышении возможности измельчения зеренной структуры материала заготовки и повышении работоспособности рабочего инструмента [10].

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете был разработан новый способ ППД на основе маятникового движения секториального рабочего инструмента [11,12]. Сущность данного способа (рис. 1) заключается в том, что заготовке 1 сообщают вращательное движение с заданной частотой вращения  $n_{з}$  относительно собственной продольной оси, а инструменту, оказывающему давление на поверхность обрабатываемой заготовки, сообщают продольную подачу  $s$  параллельную оси заготовки и колебательное круговое движение, в направлении перпендикулярном оси заготовки.

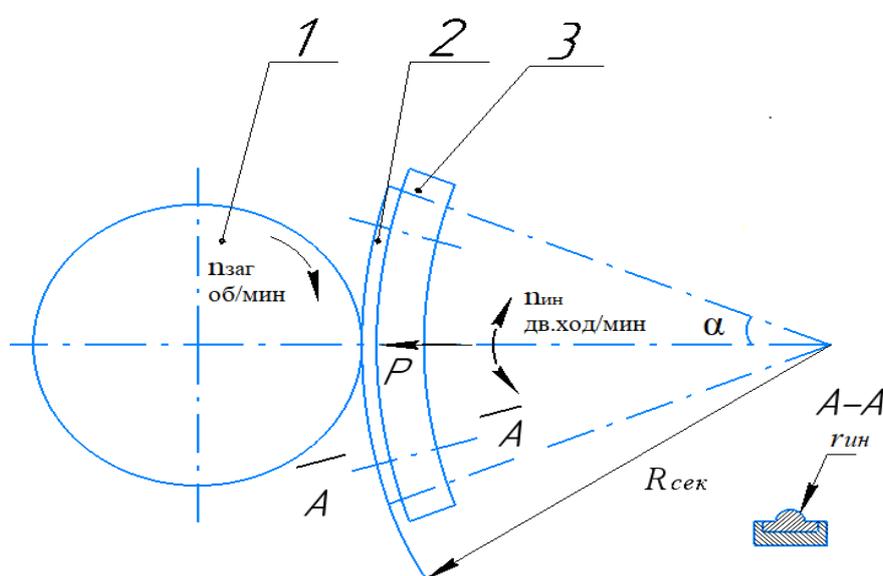


Рисунок 1. Схема маятникового поверхностного пластического деформирования

1-заготовка, 2-деформирующий элемент, 3-рабочий сектор инструмента

**Особенности схемы маятникового ППД.** Заготовка совершает постоянное направленное движение вокруг своей оси (см. рис.1), при этом деформирующий инстру-

мент совершает круговое осциллирующее движение от мотор-редуктора. В связи с этим, процесс упругопластической деформации происходящей в зоне сопряжения поверхности заготовки и деформирующего элемента, носит два характера: при движении в одном направлении заготовки и деформирующего инструмента осуществляется процесс качения в очаге деформации (если угловые скорости заготовки и инструмента совпадают), а при их встречном круговом движении происходит интенсивное скольжение в зоне деформации, которое приводит к значительному изменению микроструктуры материала.

**Постановка задачи.**

Исследовать напряженно-деформированное состояние в зоне контакта заготовки с деформирующим инструментом в виде кругового сектора при маятниковом ППД на основе использования компьютерного моделирования. Определить интенсивность временных и остаточных напряжений на поверхности цилиндра при маятниковом ППД с разной геометрией секториального рабочего инструмента.

**3. Особенности моделирования процесса маятникового ППД**

Для исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочнении разными способами ППД и для определения временных и остаточных напряжений удачно применяется компьютерное моделирование, сущность которого заключается в использовании метода конечных элементов [13,14]. Одной из широко используемых программ, эффективно реализующих данный метод, является программа ANSYS, которая и была использована в данной работе.

Для проведения расчетов при квазистатическом нагружении построена геометрическая модель в виде цилиндра и кругового сектора с радиусом скругления на цилиндрической поверхности (рис. 2).

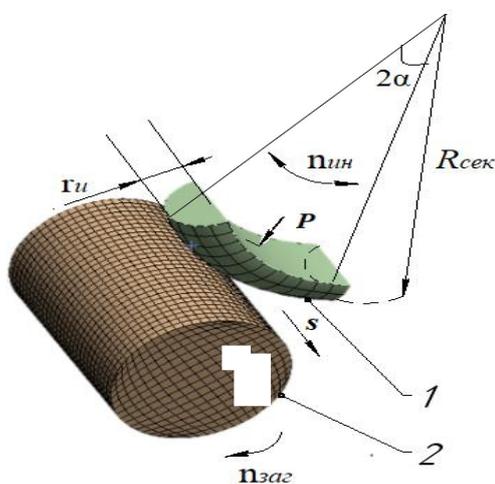


Рисунок 2. Конечно-элементная модель при маятниковым ППД секториальным инструментом

1 – круговой сектор с радиусом скругления  $r_u$ ; 2 – цилиндр диаметром  $D_{заг}$

Характеристики образца: в качестве заготовки был использован цилиндр диаметром  $D_{заг} = 20$  мм; материал – сталь 45 – упругопластический, упрочняющийся, модуль упругости  $E = 2.10^5$  МПа; Коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; диаграмма деформирования материала – билинейная (предел текучести  $\sigma_T = 360$  МПа, предел прочности  $\sigma_\sigma = 600$  МПа, модуль упрочнения  $E_T = 1,45.10^3$  МПа)

Характеристики инструмента: круговой сектор с радиусом скругления на цилиндрической поверхности; материал – ВК8, модуль упругости  $E = 6.10^5$  МПа, Коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; Коэффициент трения в зоне контакта рабочего инструмента с об-

разцом  $f = 0,15$ ; Рабочий радиус инструмента  $r_{ин} = 2 - 17$  мм, секториальный радиус рабочего инструмента  $R_{сек} = 25 - 150$  мм.

Для оценки напряженного состояния в разных точках цилиндрических образцов необходимо определить интенсивность напряжений (von – Mises) и остаточные напряжения по осям  $O_z$  (осевые  $\sigma_z^{ост}$ ),  $O_x$  (радиальные  $\sigma_r^{ост}$ ),  $O_y$  (тангенциальные  $\sigma_\phi^{ост}$ ) [15-17]. При этом, напряженное состояние цилиндра по Мизесу при использовании главных напряжений определяется по интенсивности напряжения  $\sigma_i$ .

$$\sigma_i^{ост} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{ост} - \sigma_\phi^{ост})^2 + (\sigma_\phi^{ост} - \sigma_r^{ост})^2 + (\sigma_r^{ост} - \sigma_z^{ост})^2]} \quad (1)$$

Для определения напряженно-деформированного состояния заготовки были выбраны следующие режимы упрочнения: частота вращения заготовки  $n_3 = 100$  об/мин, Частота маятникового движения рабочего инструмента  $n_{ин} = 100$  дв.х/мин, натяг  $t = 0,1$  мм, угловая амплитуда постоянная  $\alpha = \pm 30^\circ$ .

#### 4. Результаты моделирования

Напряженно-деформированное состояние заготовки в результате ППД можно оценить по двум показателям: временные и остаточные напряжения. При этом, временное напряжение возникает при непосредственном воздействии внешних сил от действия рабочего инструмента, а остаточное – при прекращении их. Временные напряжения оказывают влияние на энергосиловые характеристики процесса и глубину упрочненного слоя, давление в зоне деформации, а также на прочность и износостойкость деформирующего инструмента. Остаточные напряжения влияют на усталостную прочность, процессы разрушения, износостойкость, коррозию и другие эксплуатационные свойства изделий [18-21].

На рис. 3 показаны поля распределения интенсивности временных (а) и остаточных (б) напряжений по поперечному сечению цилиндра при  $R_{сек} = 50$  мм;  $r_{ин} = 5$  мм.

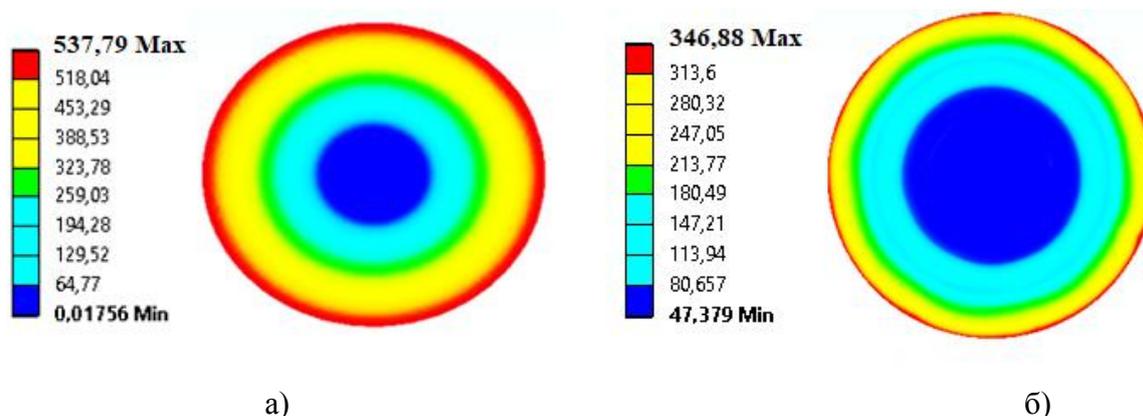


Рисунок 3. Поля распределения интенсивности временных (а) и остаточных (б) напряжений по поперечному сечению цилиндра (при  $R_{сек} = 50$  мм;  $r_{ин} = 5$  мм)

На рис. 4 представлена зависимость интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений от секториального радиуса (рис 4.а, при постоянной  $r_{ин} = 5$  мм) и от рабочего радиуса (рис 4.б, при постоянной  $R_{сек} = 50$  мм) в процессе маятникового движения секториального рабочего инструмента.

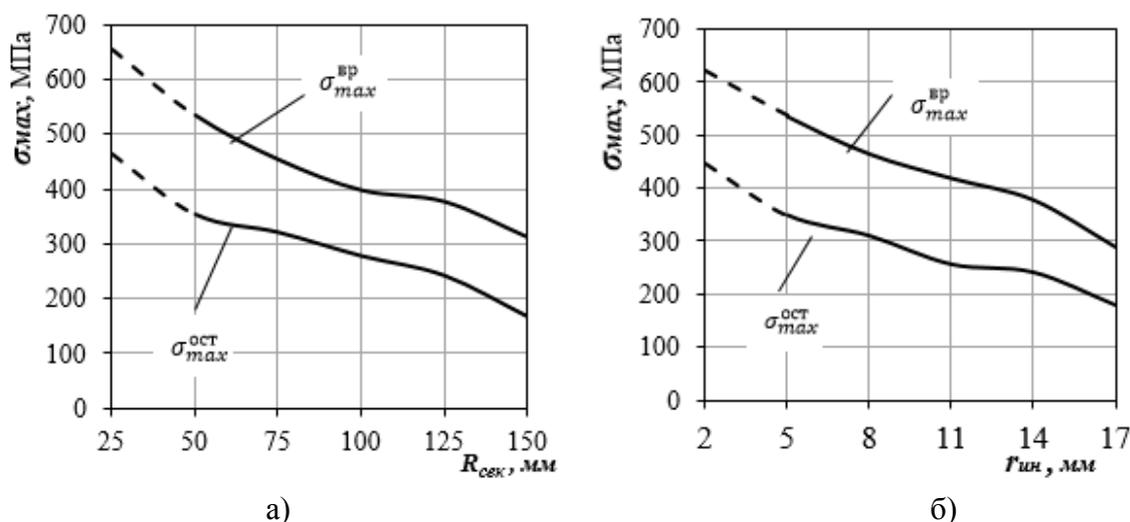


Рисунок 4. Зависимость интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений от секториального (а) и рабочего радиуса (б) инструмента

Анализируя рис. 4 можно сделать вывод о том, что, с увеличением величины секториального и рабочего радиусов деформирующего инструмента интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений монотонно снижается.

При малых значениях секториального и рабочего радиусов инструмента ( $R_{сек} = 25$  мм,  $r_{ин} = 2$  мм) возникают временные напряжения, максимальное значение которых приближаются к пределу прочности материала  $\sigma_v$  (600 МПа), а остаточные напряжения превышают предел текучести  $\sigma_T$  (360 МПа). Формирование таких напряжений в процессе упрочнения является нежелательным, так как возникает большая вероятность разрушения материала заготовки.

При значительном возрастании значений секториального и рабочего радиусов инструмента ( $R_{сек} > 125$  мм,  $r_{ин} > 14$  мм) временные напряжения оказываются меньше предела текучести  $\sigma_T$  (360 МПа), поэтому в этих случаях наблюдается только процесс упругой деформации материала без изменения микроструктуры. Следовательно, наиболее эффективный процесс упрочнения способом маятникового ППД наблюдается при рациональном подборе геометрических размеров секториального рабочего инструмента, значения которых следующие:  $R_{сек}$  от 50 до 125 мм,  $r_{ин}$  от 5 до 14 мм.

На рис. 5 показано распределения интенсивности и компонент остаточных напряжений вдоль радиуса цилиндрического образца с рациональными значениями секториального радиуса и при постоянной величине  $r_{ин} = 5$  мм.

Очевидно, что интенсивность остаточных напряжений монотонно снижается от поверхностного слоя в центральную зону цилиндра и достигает максимального значения на глубине от 1,5 до 2 мм от периферии (см. рис. 5а). Это свидетельствует о том, что пластическое течение при маятниковом воздействии эффективно осуществляется в зоне поверхностного слоя заготовки. В центральной зоне интенсивность напряжения составляет 20–45% от предела текучести материала.

На рис. 5б показано, что радиальные остаточные напряжения по сечению цилиндра монотонно увеличивается по направлению к центру поперечного сечения. При всех значениях величин секториального радиуса инструмента после маятникового воздействия формируются в основном растягивающие радиальные остаточные напряжения и незначительные сжимающие радиальные остаточные напряжения в зоне поверхностного слоя цилиндра.

ра. При  $R_{сек} = 50$  мм радиальные остаточные напряжения достигают 323 МПа, что составляет 85% от предела текучести стали 45.

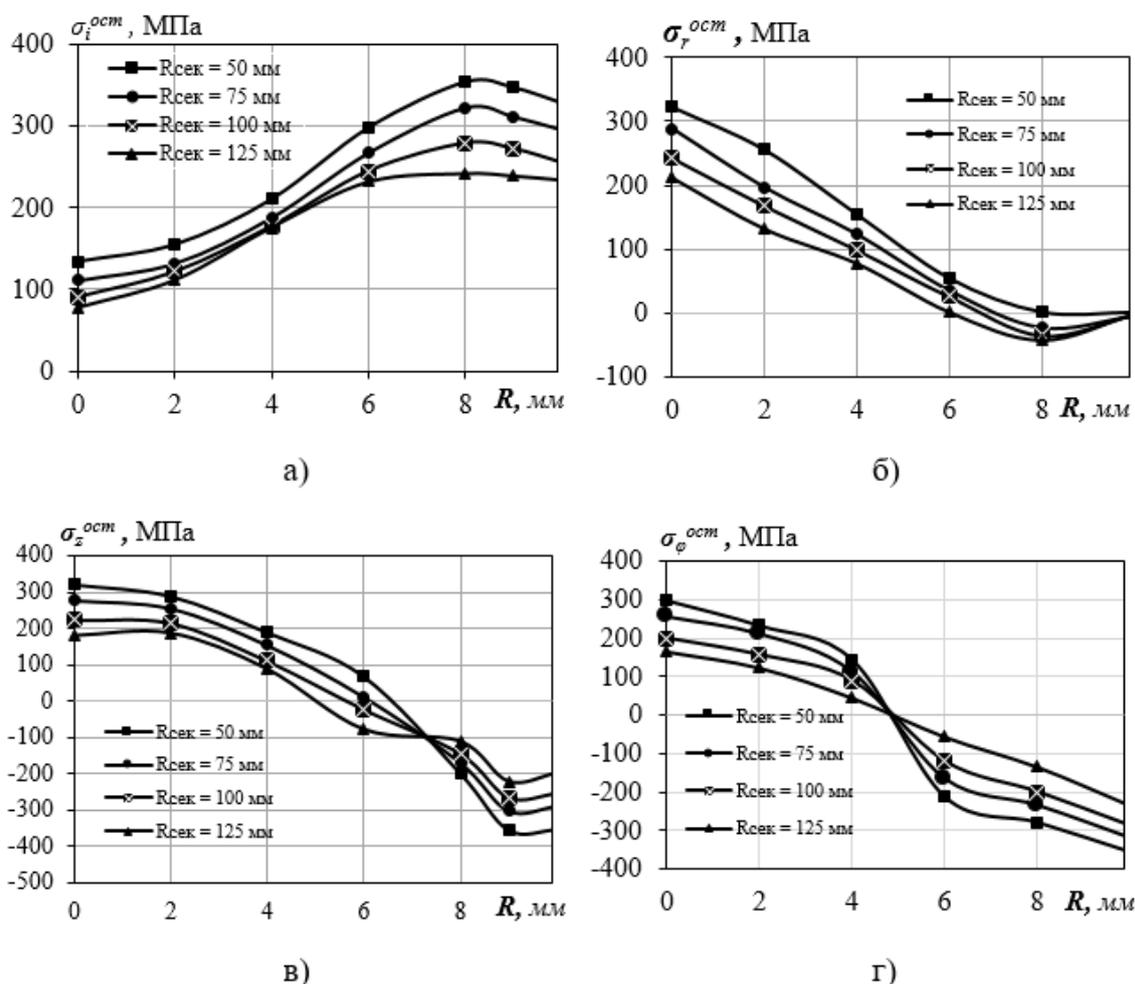


Рисунок 5. Распределения интенсивности и компонент остаточных напряжений вдоль радиуса цилиндрического образца при разных значениях  $R_{сек}$  ( $r_{ин} = 5$  мм):

а) –  $\sigma_i^{ост}$ , б) –  $\sigma_r^{ост}$ , в) –  $\sigma_z^{ост}$ , г) –  $\sigma_\varphi^{ост}$

Тангенциальные и осевые остаточные напряжения (см рис. 5 в, г) по сечению цилиндра распределяются по следующему закону: растягивающие напряжения непрерывно снижаются от центра в направлении поверхности и переходят к сжимающим, которые монотонно увеличиваются в поверхностном слое. При этом зоны, в которых происходит переход напряжений от растягивающих к сжимающим, формируются в разной глубине: для тангенциальных при глубине  $2,5 < p < 3,5$  мм; а для осевых при глубине  $4,5 < p < 5,5$  мм.

На рис. 6 показано распределения интенсивности и компонент остаточных напряжений вдоль радиуса цилиндрического образца с рациональными значениями рабочего радиуса при постоянной величине  $R_{сек} = 50$  мм.

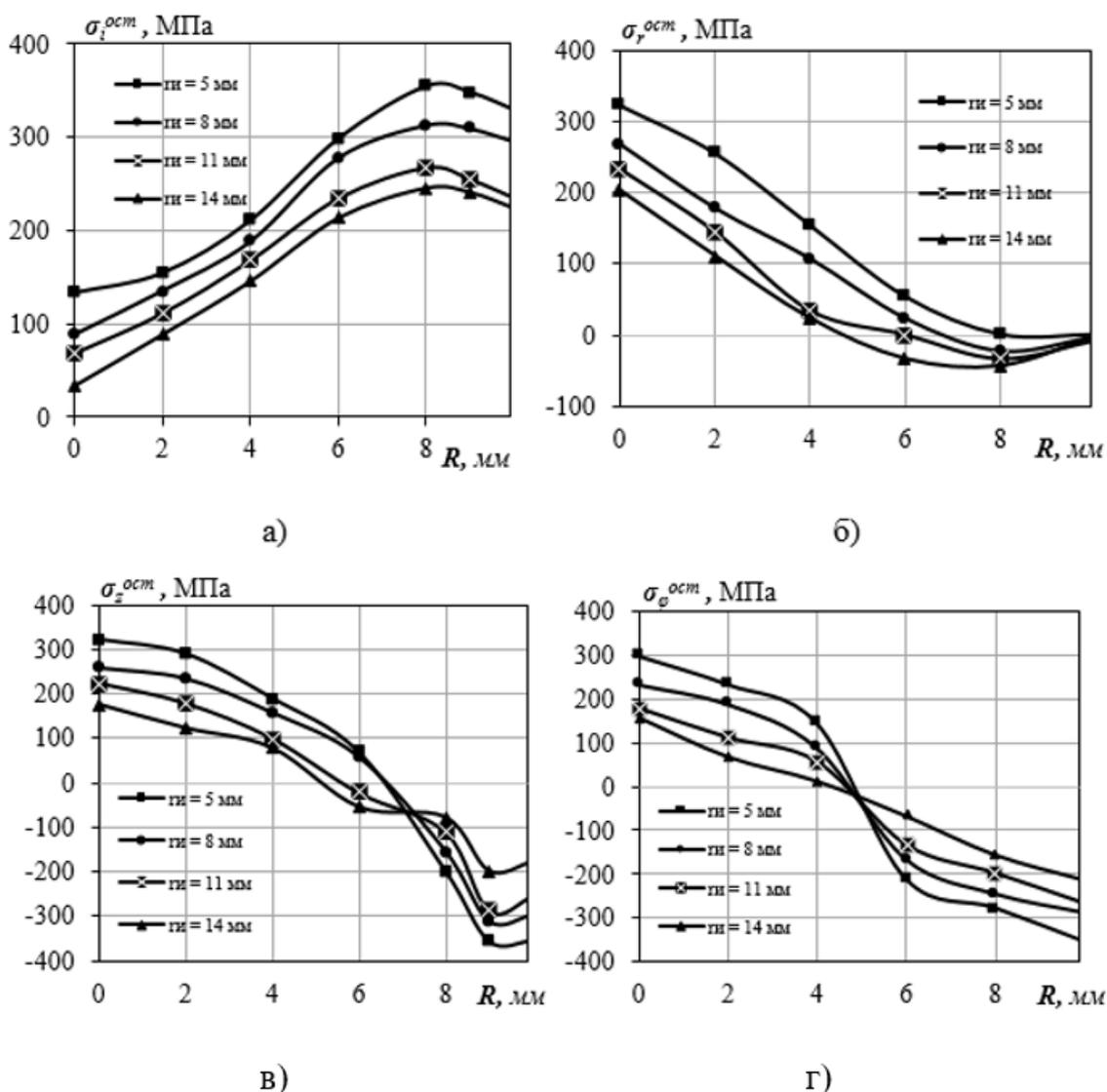


Рисунок 6. Распределения интенсивности и компонент остаточных напряжений вдоль радиуса цилиндрического образца при разных значениях  $r_{ин}$  ( $R_{сек} = 50$  мм):  
 а) –  $\sigma_i^{ост}$ , б) –  $\sigma_r^{ост}$ , в) –  $\sigma_z^{ост}$ , г) –  $\sigma_\varphi^{ост}$

Анализируя рис. 6 можно сделать вывод о том, что закон распределения интенсивности и компонент остаточных напряжений с увеличением значения рабочего радиуса инструмента практически не отличается от закона распределения напряжений в зависимости от секториального радиуса. Это можно объяснить тем, что изменение этих двух радиусов непосредственно оказывает значительное влияние на размеры контактной зоны между заготовкой и рабочим инструментом, что сказывается на величине остаточных напряжений.

### 5. Глубина пластической деформации

Упрочнения разными способами ППД сопровождается пластической деформацией поверхностных слоев материала, глубина которой зависит от величины временных радиальных напряжений в зоне контакт при непосредственном воздействии рабочего инструмента [22]. Информация об эффективной глубине проникновения пластиче-

ской деформации является источником для оценки физико-механических и эксплуатационных свойств упрочненных деталей ППД.

Глубина пластической деформации характеризует зону, в которой интенсивность напряжений достигает предел текучести материала. С помощью компьютерной программы можно определить величину глубины упрочненных слоев путем анализа изополос распределения деформации, которые представлены на рис. 7.

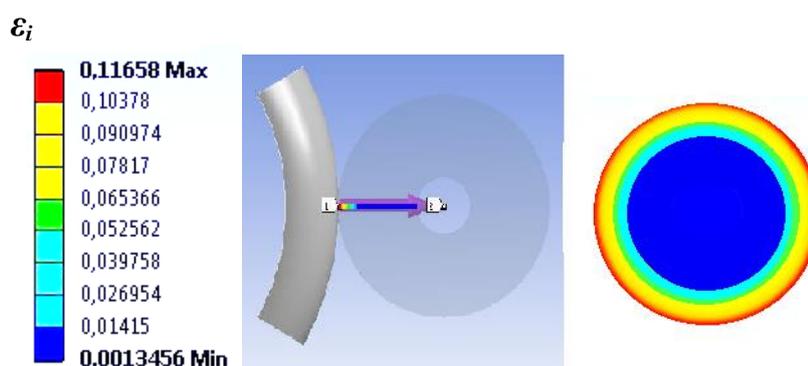


Рисунок 7. Изополосы распределения пластической деформации после маятникового ППД

На рис. 8 показана зависимость глубины пластической деформации от секториального и рабочего радиусов деформирующего инструмента. Видно, что глубина упрочненных слоев достигает максимального значения ( $h = 2,85$  мм) при минимальных значениях секториального и рабочего радиусов инструмента. С увеличением секториального и рабочего радиуса инструмента глубина пластической деформации  $h$  уменьшается.

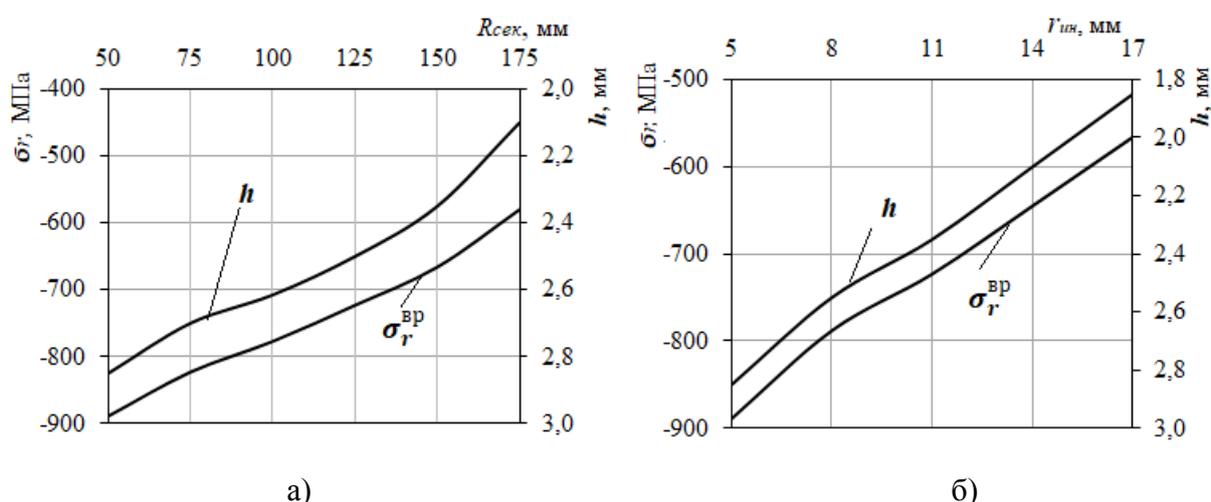


Рисунок 8. Зависимость глубины пластической деформации от секториального (а) и рабочего (б) радиусов деформирующего инструмента

Проведенные исследования показали, что значения секториального и рабочего радиусов инструмента непосредственно оказывают влияние на изменение интенсивности временных и остаточных напряжений. При этом интенсивность максимальных вре-

менных и остаточных напряжений находится в обратной зависимости от величины секториального и рабочего радиуса.

## 6. Заключение

Таким образом, динамическое моделирование маятникового воздействия рабочего инструмента на основе компьютерной программы ANSYS позволяют сделать следующие выводы:

1. С увеличением секториального радиуса рабочего инструмента интенсивность напряжений уменьшается на 15-20%. При малом значении секториального радиуса формируется интенсивность напряжений, которая превышает предел прочности материала, а при большом секториальном радиусе наблюдается только процесс упругой деформации, который не повышает степень упрочнения детали.

2. С увеличением рабочего радиуса инструмента интенсивность временных напряжений уменьшается на 20-25%. При этом закон распределения интенсивности и компонент временных напряжений вдоль радиуса цилиндрического образца для некоторых рабочих радиусов совпадает с закономерностью распределения напряжений в зависимости от секториальных радиусов.

3. Глубина пластической деформации находится в обратной зависимости от секториального и рабочего радиусов деформирующего инструмента, значение которой повышается в пределах 1,85 - 2,85 мм при уменьшении секториального и рабочего радиусов в исследуемом режиме упрочнения.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием / Л. Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
2. Зайдес, С. А. Поверхностное пластическое деформирование / С.А. Зайдес, В. А. Забродин, В. Г. Мураткин. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2002. – 304 с.
3. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – Москва: Машиностроение, 2000. – 320 с.
4. Блюменштейн, В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – Москва: Машиностроение, 2007. – 399 с.
5. Зайдес, С. А. Оценка напряженного состояния при стесненных условиях локального нагружения / С.А. Зайдес, Нго Као Кыонг. – Упрочняющие технологии и покрытия, 2016. – № 10. – С. 6–9.
6. Алексеев, П. Г. Повышение износостойкости стальных деталей путем поверхностного упрочнения / П. Г. Алексеев // Станки и инструмент. – 1968. – № 1. – С. 7–9.
7. Асланян, И. Р. Повышение ресурса подшипников скольжения поверхностным пластическим деформированием / И. Р. Асланян и др. // Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием: монография – Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2014. – Гл. 7. – С. 348–383.
8. Бабичев, А. П. Виброударная отделочно-упрочняющая обработка деталей нетрадиционных форм и размеров наукоемких изделий (на примере силовых деталей вертолета) / А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2011. – № 1. – С. 38–43.
9. Ежелев, А. В. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием / А.В. Ежелев, И.Н. Бобровский, А.А. Лукьянов // Фундаментальные исследования. 2012. – № 6. – Ч. 3. – С. 642–646.

10. «Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология» 16/04/202/ Зайдес С.А., Хо-Минь Куан. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование при отделочно-упрочняющей обработке цилиндрических деталей транспортной техники: международный сб. науч. трудов. – Якутск, 2021 – С.152-157.
11. Патент 2753807, СПК В24В 39/4. Способ поверхностного пластического деформирования цилиндрических деталей / Зайдес, С. А., Хо Минь Куан; опубл. 23.08.2021.
12. Патент 2751947, СПК В24В 39/04. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / Зайдес С.А., Хо Минь Куан, опубл. 21.07.2021.
13. Вулых, Н. В. Анализ напряженно-деформированного состояния при моделировании микронеровностей упрочняемых поверхностей / Н. В. Вулых, С. А. Зайдес // Механика деформируемых сред в технологических процессах: межвузовский сб. науч. трудов. – Иркутск, 2000. – С. 101-105.
14. Максимов, Ю.В. Математическое моделирование формообразования деталей класса нежестких валов / Максимов Ю.В., Анкин А.В., Матяш В.И. // Вестник машиностроения, 1995. – № 9. – С.28-31.
15. Белов, В. А. Технология обработки плоскостей пластическим деформированием / В.А. Белов. – Киев, 1972. – 246 с.
16. Бобровский, Н. М. Технология обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазывающе-охлаждающих технологических средств / Н. М. Бобровский, И.Н. Бобровский, П.А. Мельников, А.В. Ежелев. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2012. – 142 с.
17. Горленко, О.А. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных показателей деталей машин / О.А. Горленко // Трение и износ. – 1997. – Т. 18. – № 3. – С. 361–368.
18. Губанов, В. Ф. Модернизированная технология отделочно-упрочняющей обработки выглаживанием / В.Ф.Губанов // Автоматизация и современные технологии. – 2012. – № 2. – С. 10–12.
19. Saiaf Bin Rayhan, Md Mazedur Rahman, Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer, Procedia Structural Integrity, Volume 28, 2020, Pages 1892-1900, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>.
20. Iryna Ablieieva, Leonid Plyatsuk, Ihor Roi, Oleh Chekh, Sabina Gabbassova, Kseniia Zaitseva, Serhii Lutsenko. Study of the oil geopermeation patterns: A case study of ANSYS CFX software application for computer modeling // Journal of Environmental Management, Volume 287, 2021, 112347, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112347>.
21. M. Syrigou, R.S. Dow. Strength of steel and aluminium alloy ship plating under combined shear and compression/tension Eng. Struct., 166 (2018), pp. 128-141.
22. Способ определения толщины упрочненного наклепом поверхностного слоя: пат. 2194263 Рос. Федерация: МПК 7 G 01 № 3/00 / М.М. Матлин, С.Л. Лебский, А.И. Фролова; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. – 2002.

Поступила в редколлегию 13.01.2022 г.