

Технология и технологические машины

УДК 621.7.011

DOI 10.18698/0536-1044-2016-7-56-63

Современный подход к определению напряженного состояния в очаге деформации при локальном нагружении


С.А. Зайдес, Нго Као Кыонг

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83

Modern Approach to Determine the Stress State in the Deformation Zone under Local Loading

S.A. Zaides, Ngo Cao Cuong

Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83

 e-mail: zsa@istu.edu, cuong.istu@gmail.com

i Определение напряженного состояния в очаге деформации при поверхностном пластическом деформировании является важной задачей для осуществления технологического процесса и оказывает непосредственное влияние на технологическое качество и эксплуатационные характеристики деталей машин и изделия в целом. На основе теории малых упругопластических деформаций и метода конечных элементов с помощью прикладной программы ANSYS создана математическая модель локального нагружения, позволяющая определять напряженное состояние в очаге деформации и остаточные напряжения в упроченной детали. Рассмотрено влияние различных факторов на напряженное состояние: диаметра шара, глубины внедрения, материала образца и диаметра цилиндрического образца. Полученные результаты показали, что применение метода конечных элементов в анализе технологических процессов упрочнения позволяет глубже понять процессы формирования напряжения, происходящие во время деформирования заготовки.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, напряженное состояние, остаточное напряжение, локальное нагружение, диаметр шара, глубина упрочнения.

i Determining the stress state in the deformation zone under surface plastic deformation is an important issue to consider when implementing the technological process. It has a direct impact on the technological quality and the operational characteristics of the machine parts and products in general. The mathematical model of local hardening is built based on the small elastic-plastic deformation theory and the finite element method using ANSYS software. The model can be used for determining the stress state in the deformation zone and residual stresses in the hardened part. The influence of various factors on the stress state is considered such as the ball diameter, depth of penetration, material of the sample and diameter of the cylindrical sample. The results obtained have shown that the application of the finite element

method for the analysis of the technological processes of hardening allows better understanding of the stress formation processes happening when the workpiece is deformed.

Keywords: surface plastic deformation, stress state, residual stress, local loading, ball diameter, depth of hardening.

Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД) является одним из основных способов повышения надежности деталей машин. В настоящее время существует достаточно большое разнообразие методов ППД, которые классифицируют в соответствии с ГОСТ 18296–72 [1]. Методы ППД различаются по схеме внедрения инструмента, виду энергии, форме и размеру очага деформации, количеству инденторов (одноинденторное или многоинденторное деформирование), воздействию (однократному или многократному) деформирующего инструмента на обрабатываемую точку тела, траектории движения индентора и детали и др.

Среди деформационных методов упрочнения деталей машин широкое распространение получили локальные: обкатка шариком, роликом, диском, выглаживание алмазным индентором. Характерным признаком этих методов является стабильность формы и размеров очага деформации. Интенсивность пластической деформации поверхностного слоя зависит от технологических факторов обработки: силы, формы и размеров деформирующего элемента, подачи, свойств обрабатываемого материала [2]. Напряженное состояние, возникающее в очаге деформации при течении металлов, представляет собой сложный процесс и до настоящего времени недостаточно изучено.

Напряженное состояние материала при деформационном упрочнении можно условно разделить на временное и остаточное. Первое из них возникает при действии внешних сил, второе — при их отсутствии. Временное напряжение влияет на энергосиловые характеристики процесса, степень и глубину упрочненного слоя, давление в зоне контакта, шероховатость поверхности заготовки, прочность и стойкость деформирующего инструмента, а остаточные напряжения — на усталостную прочность, процесс разрушения, износостойкость, коррозию и другие эксплуатационные свойства изделий [1, 3, 4].

Таким образом, определение напряженного состояния в очаге деформации является важной задачей для осуществления технологического процесса и оказывает непосредственное

влияние на технологическое качество и эксплуатационные характеристики деталей машин и изделия в целом.

Оценке качества упрочненного слоя после ППД посвящено много работ, в частности [4, 5]. Установлено влияние ППД на шероховатость и волнистость поверхности, глубину упрочнения, значения остаточных напряжений, контактную жесткость и выносливость [1]. Следует отметить, что экспериментальные исследования проводили «вокруг» очага пластической деформации. Для исследования очага формоизменения применяли в основном косвенные методы: линии течения (тока), длительных сеток, линий скольжения, поляризационно-оптический метод и др. [6–8]. Получены важные результаты для науки и практики, но они носят в основном качественный характер, так как очаг деформации остается «черным ящиком».

Новый подход к изучению напряженно-деформированного состояния в очаге упруго-пластической деформации позволяет проводить конечно-элементное моделирование и создавать современные компьютерные программы.

В настоящее время методы ППД исчерпали свои технологические возможности. Идет поиск новых схем нагружения и источников энергии для решения поставленных задач [6, 9, 10]. Для оценки возможностей новых технологий необходимо провести сравнение напряженно-деформированного состояния с простыми известными схемами нагружения локальным инструментом.

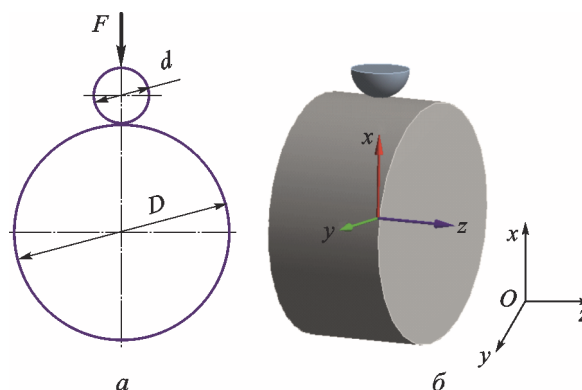


Рис. 1. Схема (а) и модель (б) нагружения цилиндрического образца жестким шаром

Цель работы — исследование напряженного и остаточного состояний поверхностного слоя деталей при вдавливании жесткого шара в цилиндрическую поверхность упругопластического тела.

Моделирование локального нагружения. Численное решение упругопластической задачи для неоднородного материала выполнено с помо-

щью программы ANSYS, основанной на методе конечных элементов и предназначенной для расчета напряжений и деформаций в нагруженном теле. Рассмотрим влияние глубины внедрения шара, диаметра шара, марки материалов образца и масштабного фактора на напряженное состояние поверхностного слоя цилиндрической детали.

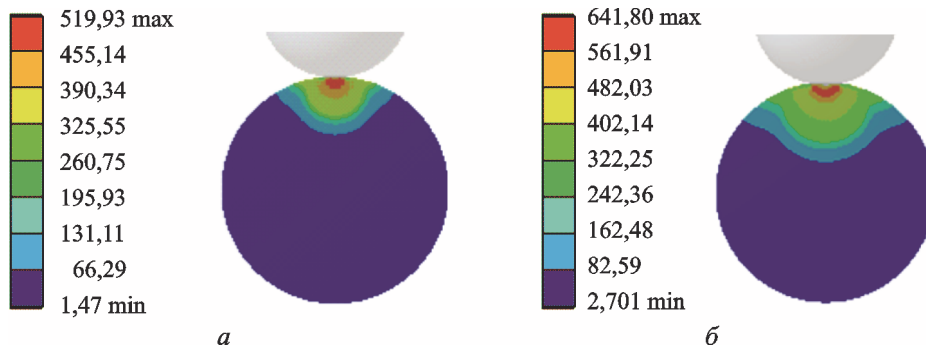


Рис. 2. Распределение временных напряжений, МПа, под отпечатком шара при различной глубине его внедрения:
а — $t = 0,1$ мм; б — $t = 0,2$ мм

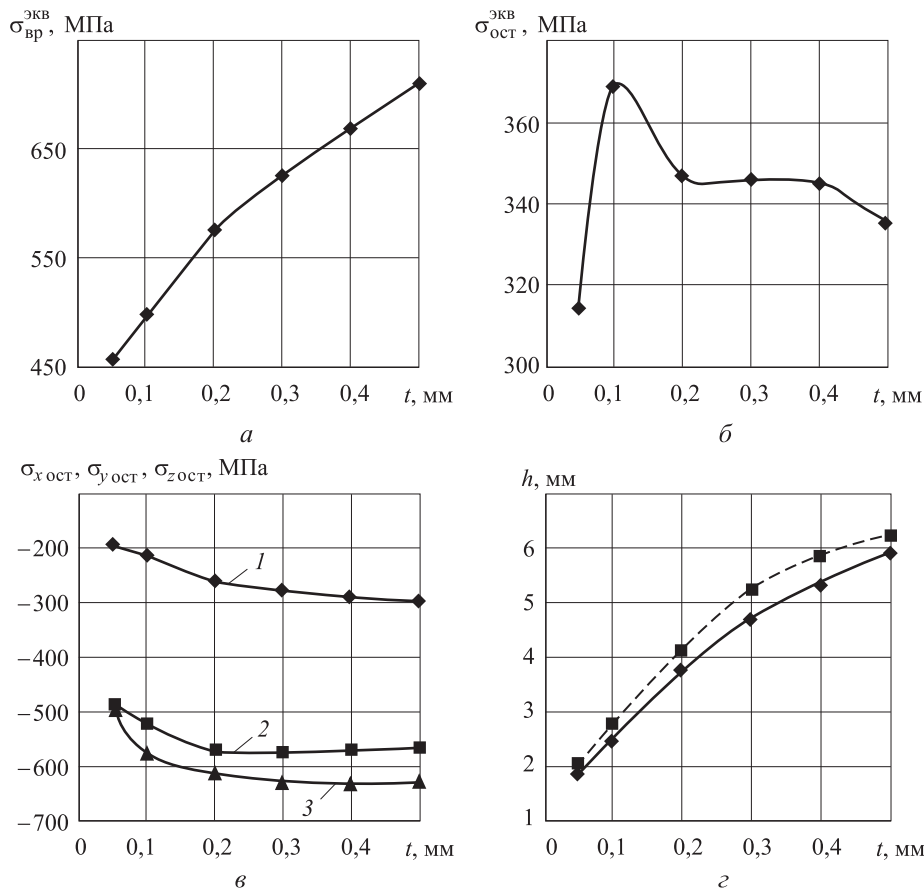


Рис. 3. Зависимости эквивалентного временного напряжения $\sigma_{вр}^{эКВ}$ (а), максимального эквивалентного остаточного напряжения $\sigma_{ост}^{эКВ}$ (б), компонент $\sigma_{x_{ост}}$ (1), $\sigma_{y_{ост}}$ (2), $\sigma_{z_{ост}}$ (3) максимального остаточного напряжения (в) и глубины h упрочнения (з) под отпечатком от глубины t внедрения шара в цилиндрическую поверхность (---- — результаты эксперимента [1])

Формирование геометрии расчетной области проводили согласно схеме нагружения цилиндрической поверхности образца жестким шаром, представленной на рис. 1 вместе с моделью.

Характеристики цилиндрического образца: форма поверхности — цилиндрическая ($D = 15$ мм); 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.

Характеристики индентора: тип — шар; материал — твердый сплав ВК8; модуль упругости $E = 6 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Результаты моделирования. Рассмотрим влияние основных параметров процесса деформирования на напряженное состояние в очаге деформации и остаточное эквивалентное напряжение после разгрузки.

• Влияние глубины внедрения шара ($d = 10$ мм).

На рис. 2 приведены примеры распределения временных напряжений под отпечатком шара при различной глубине его внедрения $t = 0,1; 0,2$ мм. Как видно из рис. 3, увеличение глубины внедрения шара приводит к росту временных напряжений, а остаточные напряжения увеличиваются до максимального значения и затем уменьшаются (в рассматриваемом случае при $t = 0,1$ мм). Это объясняется существованием оптимального значения глубины внедрения, при превышении которого происходит исчерпание запаса пластичности и перенаклеп поверхностного слоя, что приводит к уменьшению остаточных напряжений.

Небольшое расхождение между тангенциальным $\sigma_{y_{ост}}$ и осевым $\sigma_{z_{ост}}$ максимальными остаточными напряжениями при нагружении цилиндрической поверхности объясняется круглой формой образца.

При определенной геометрии деформирующего инструмента глубина упрочнения возрастает

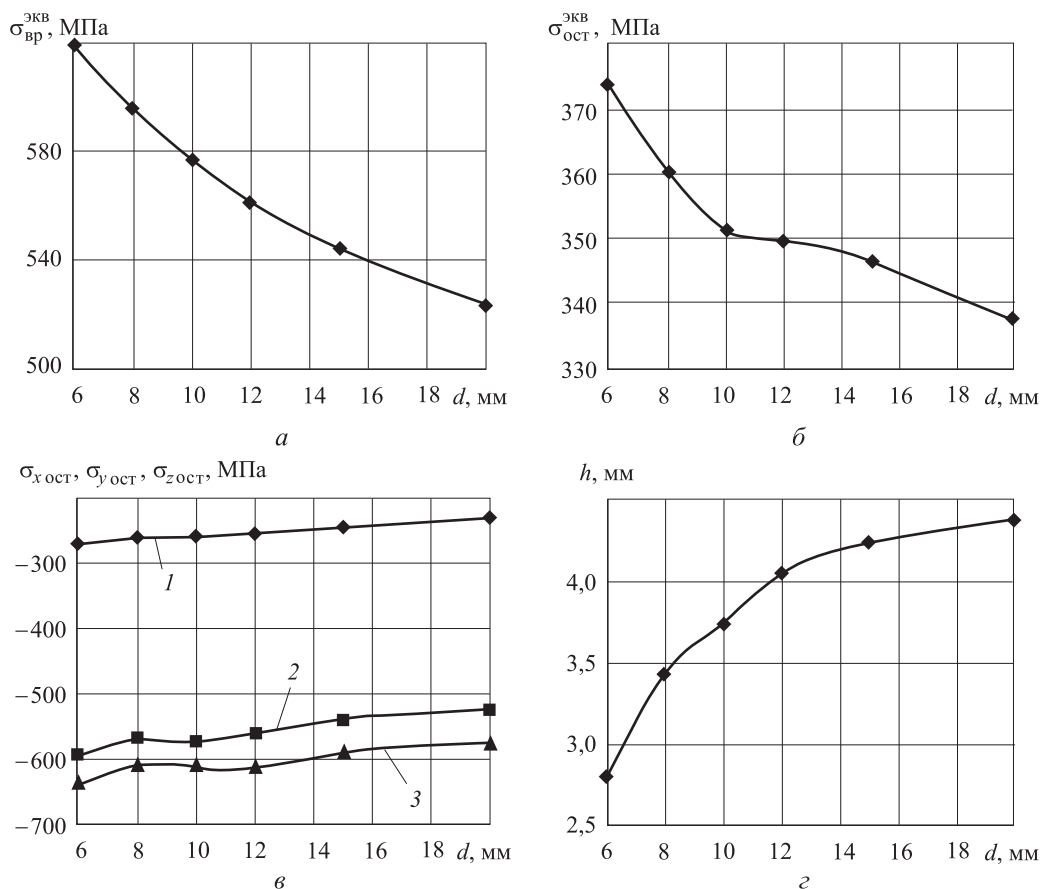


Рис. 4. Зависимости эквивалентного временного напряжения $\sigma_{вр}^{экр}$ (а), максимального эквивалентного остаточного напряжения $\sigma_{ост}^{экр}$ (б), компонент $\sigma_{x_{ост}}$ (1), $\sigma_{y_{ост}}$ (2), $\sigma_{z_{ост}}$ (3) максимального остаточного напряжения (в) и глубины h упрочнения (г) под отпечатком от диаметра d шара

тает почти прямо пропорционально глубине внедрения шара в цилиндрическую поверхность. Результаты компьютерного моделирования соответствуют экспериментальным данным, приведенным в работе [1].

- Влияние диаметра шара ($t = 0,2$ мм).

Анализ результатов моделирования показал, что определяющим параметром, влияющим на значения остаточных сжимающих напряжений, является диаметр шара, используемый при обработке ППД. По кривым, приведенным на рис. 4, можно сделать вывод, что при постоянной глубине внедрения шара с увеличением диаметра деформирующего инструмента происходит рост контактной поверхности. При этом уменьшаются напряжения, сдвигающие фронт металла, а также временные и остаточные напряжения с их компонентами. Это объясняется тем, что при малых диаметрах шаров под ними при внедрении в цилиндрическую поверхность образуется упругопластический клин, влияние которого на напряженное состояние в очаге деформации распространяется в большей степени, чем при больших диаметрах шаров [3]. При постоянной глубине внедрения увеличение диаметра шара приводит к увеличению глубины упрочнения.

- Влияние марки материала ($d = 10$ мм, $t = 0,2$ мм).

Механические характеристики материала влияют на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации и на процессы разгрузки при выходе инструмента, а следовательно, и на остаточное напряженное состояние упрочненных изделий. Кроме того, трудоемкость эксперимента при определении остаточ-

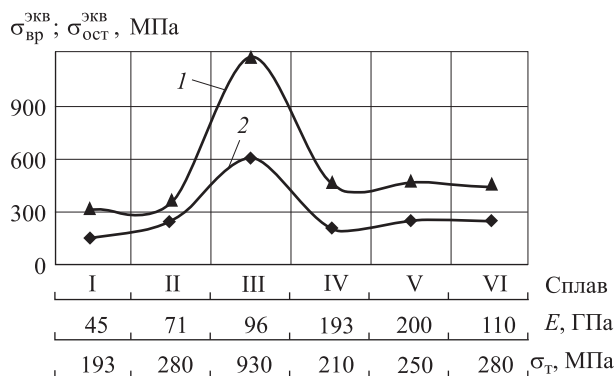


Рис. 5. Зависимость эквивалентных временного $\sigma_{вр}^{эКВ}$ (1) и остаточного $\sigma_{ост}^{эКВ}$ (2) напряжений от физико-механических свойств сплавов: I — магниевого; II — алюминиевого; III — титанового; IV — нержавеющей; V — конструкционного; VI — медного

ных напряжений во многом зависит от механических свойств исследуемых изделий. Например, при резании труднообрабатываемых, высокопрочных и вязких металлов довольно сложно не только получить качественную поверхность, но и обеспечить минимальную температуру в зоне резания. С учетом этого следует рассмотреть вопрос о степени влияния на остаточные напряжения механических свойств обрабатываемого материала.

На качество упрочненного поверхностного слоя большое влияние оказывают физико-механические свойства обрабатываемой детали: предел текучести σ_T и модуль упругости E . Как видно из рис. 5, при одинаковом пределе текучести $\sigma_T = 280$ МПа (алюминиевый и медный сплавы) большие напряжения возникают у материала с более высоким модулем упругости. Эта зависимость наблюдается как у магниевого, так и у нержавеющей сплава. С ростом предела текучести материала и модуля упругости видна тенденция к увеличению напряжений.

Глубина упрочнения в значительной мере зависит от предела текучести. Увеличение σ_T приводит к уменьшению глубины наклепа. При одинаковом пределе текучести глубина упрочнения больше у материала, имеющего более высокий модуль упругости (рис. 6).

- Влияние диаметра образца ($d = 10$ мм, $t = 0,2$ мм).

Интенсивность напряжений в очаге деформации зависит не только от натяга, размеров деформирующего инструмента, физико-механических свойств обрабатываемого материала, но и от диаметра образца (заготовки). Из рис. 7, а видно, что малым диаметрам D заготовки соот-

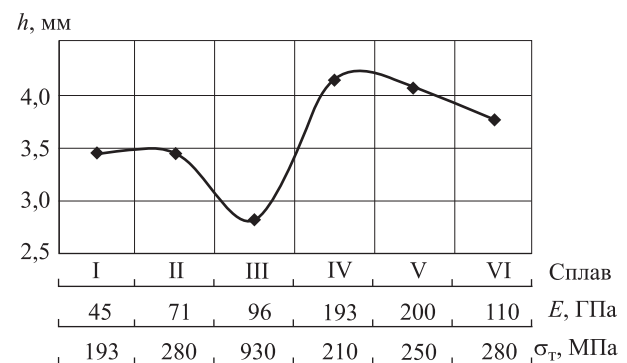


Рис. 6. Зависимость глубины h упрочнения от физико-механических свойств сплавов: I — магниевого; II — алюминиевого; III — титанового; IV — нержавеющей; V — конструкционного; VI — медного

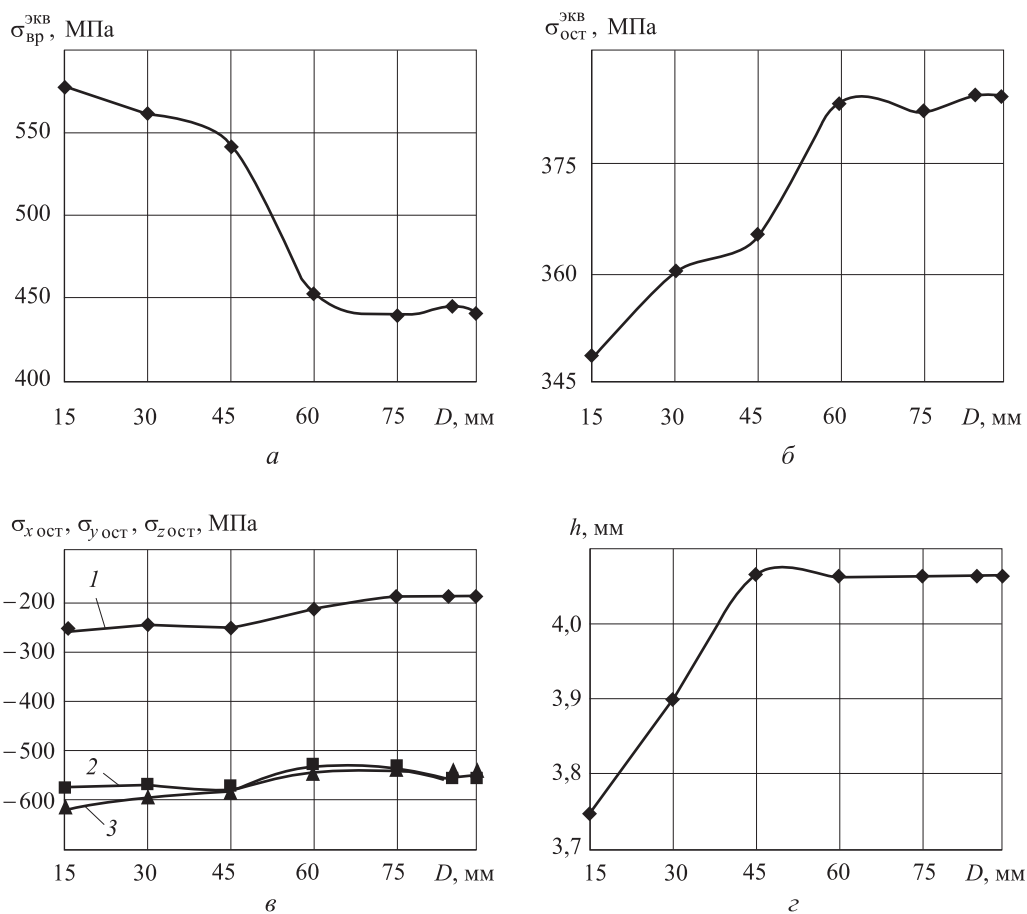


Рис. 7. Зависимость эквивалентного временного напряжения $\sigma_{вр}^{эКВ}$ (а), максимального эквивалентного остаточного напряжения $\sigma_{ост}^{эКВ}$ (б), компонент $\sigma_{xост}$ (1), $\sigma_{yост}$ (2), $\sigma_{zост}$ (3) максимального остаточного напряжения (в) и глубины h упрочнения (г) под отпечатком от диаметра D образца

ветствуют бóльшие временные напряжения, но с увеличением диаметра напряжение плавно падает и начиная с $D = 60$ мм, практически перестает изменяться. При одинаковой глубине вдавливания шара с увеличением диаметра образца временные напряжения плавно уменьшаются, а остаточные напряжения увеличиваются. При диаметре $D > 60$ мм их значения практически не изменяются. При постоянном размере шара и постоянной глубине внедрения с увеличением диаметра образца глубина упрочнения возрастает до определенного значения (рис. 7, г).

Выводы

1. На основе метода конечных элементов разработана расчетная математическая модель процесса вдавливания шара в упругопластическое тело, позволяющая определять напряженное состояние в процессе деформирования и остаточное напряженное состояние при локальном нагружении.

2. Установлено влияние глубины внедрения, диаметра деформирующего инструмента, характеристики материала и масштабного фактора на напряженное состояние детали:

существует оптимальное значение глубины внедрения шара, при котором формируются максимальные сжимающие остаточные напряжения (в рассматриваемом случае $t = 0,1$ мм);

увеличение диаметра деформирующего шара приводит к уменьшению значений остаточных напряжений;

бóльшие напряжения возникают у материалов, имеющих повышенные значения предела текучести и модуля упругости;

при увеличении диаметра цилиндрического образца до определенного значения (в рассматриваемом случае $D = 60$ мм) напряжения практически не изменяются.

3. Результаты исследования показали, что применение конечно-элементной модели при анализе технологических процессов упрочнения позволяет глубже понять процессы форми-

рования напряжения, происходящие во время деформирования заготовки. Анализ полученных при моделировании, позволит подобрать рациональный режим для формования изделия, что существенно увеличит его качество.

Литература

- [1] Одинцов Л.Г. *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник*. Москва, Машиностроение, 1987. 328 с.
- [2] Зайдес С.А. *Охватывающее поверхностное пластическое деформирование*. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2001. 309 с.
- [3] Поляк М.С. *Технология упрочнения*. В 2 т. Т. 2. Москва, Л.В.М. — СКРИПТ, Машиностроение, 1995. 688 с.
- [4] Суслов А.Г. *Качество поверхностного слоя деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2000. 320 с.
- [5] Зайдес С.А. *Энциклопедия поверхностного пластического деформирования*. Иркутск, Изд-во ИрНИТУ, 2015. 394 с.
- [6] Зайдес С.А. *Технологии экспериментальных исследований*. Иркутск, Изд-во НИИрГТУ, 2011. 572 с.
- [7] Смелянский В.М. *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва, Машиностроение, 2002. 299 с.
- [8] Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. *Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2007. 399 с.
- [9] Зайдес С.А., Исаев А.Н. *Технологическая механика осесимметричного деформирования*. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2007. 432 с.
- [10] Зайдес С.А. *Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием*. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2014. 559 с.

References

- [1] Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: spravochnik* [Hardening and finishing details of surface plastic deformation: a handbook]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1987. 328 p.
- [2] Zaides S.A. *Okhvatyvaiushchee poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie* [Covering the surface plastic deformation]. Irkutsk, INRTU publ., 2001. 309 p.
- [3] Poliak M.S. *Tekhnologiya uprochneniia* [Hardening technology]. In 2 vol. Vol. 2. Moscow, L.V.M. — SKRIPT publ., Mashinostroenie publ., 1995. 688 p.
- [4] Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloia detalei mashin* [The quality of the surface layer of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2000. 320 p.
- [5] Zaides S.A. *Entsiklopediia poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia* [Encyclopedia of surface plastic deformation]. Irkutsk, INRTU publ., 2015. 394 p.
- [6] Zaides S.A. *Tekhnologii eksperimental'nykh issledovaniia* [Technology experimental research]. Irkutsk, INRTU publ., 2011. 572 p.
- [7] Smelianskii V.M. *Mekhanika uprochneniia detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics hardening of parts by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2002. 299 p.
- [8] Bliumenshtein V.Iu., Smelianskii V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniia na stadiakh obrabotki i ekspluatatsii detalei mashin* [The mechanics of the process of succession in the stages of processing and operation of the machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2007. 399 p.
- [9] Zaides S.A., Isaev A.N. *Tekhnologicheskaiia mekhanika osesimmetrichnogo deformirovaniia* [Technological mechanics of axisymmetric deformation]. Irkutsk, INRTU publ., 2007. 432 p.
- [10] Zaides S.A. *Obrabotka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Processing parts by surface plastic deformation]. Irkutsk, INRTU publ., 2014. 559 p.

Информация об авторах

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

НГО КАО КЫОНГ (Иркутск) — аспирант кафедры «Машиностроительные технологии и материалы». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: cuong.istu@gmail.com).

Information about the authors

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

NGO CAO CUONG (Irkutsk) — Postgraduate, Mechanical Engineering Technologies and Materials Department. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: cuong.istu@gmail.com).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
Н.Е. Зубова, Е.А. Микрина, В.Н. Рябченко

«Матричные методы в теории и практике систем автоматического управления летательных аппаратов»

Рассмотрены классические и актуальные задачи теории управления линейными динамическими системами с многими входами и многими выходами, основанные на использовании матричных методов, а также практические вопросы применения этих методов к системам автоматического управления летательных аппаратов (самолетов, вертолетов и космических аппаратов различного назначения).

Издание содержит подходы к анализу и синтезу линейных динамических систем, построению бортовых алгоритмов, ориентированных на аналитические решения задач управления, наблюдения и идентификации. Приведены как основные теоретические положения соответствующих разделов теории управления линейными динамическими системами, так и решения многочисленных практических задач в области автоматического управления летательных аппаратов.

Для специалистов в области прикладной математики, общей теории управления, систем автоматического управления летательных аппаратов, инженеров, научных работников, аспирантов и студентов соответствующих 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; www.baumanpress.ru