

В. С. ЖЕРНАКОВ, Т. Н. МАРДИМАСОВА, М. Р. АРСЛАНОВ

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ОТВЕРСТИЙ

Обсуждаются проблемы моделирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием и определения возникающих при этом остаточных напряжений и деформаций. На примере упрочнения зон концентрации напряжений около отверстий проиллюстрирован один из подходов к решению этой проблемы, суть которого заключается в представлении процесса обработки как сложного упругопластического деформирования и применении специальных алгоритмов учета немонотонности нагружения и разгрузки с привлечением теорий пластичности. Исследованы напряженно-деформированное состояние в пластине с отверстием в процессе обработки и остаточные напряжения и деформации. Показано влияние остаточных напряжений на напряженное состояние конструкции в процессе эксплуатации. *Остаточные напряжения; технологические методы; упрочнение поверхности; пластическое деформирование; зоны концентрации; моделирование процессов*

### ВВЕДЕНИЕ

Для современных машин и аппаратов характерна тенденция значительного увеличения надежности и заданного ресурса. Подобный рост обеспечивается долговечностью и прочностью сборочных единиц и комплектующих машин и аппаратов, а также их соединениями. До 75–80 % всех усталостных разрушений происходит в местах концентраторов напряжений.

Одним из наиболее эффективных технологических методов повышения несущей способности и долговечности элементов конструкций является упрочнение их поверхностным пластическим деформированием (ППД). На практике используются различные варианты этого метода: обкатывание шариками, роликами, дорнование, опрессовка, алмазное выглаживание, чеканка, обдувка дробью и т. д. [1–8].

Суть рассматриваемого метода упрочнения состоит в контактном воздействии на обрабатываемую поверхность специальным инструментом, создающим на ней высокие контактные напряжения и температуры, вызывающие появление пластических деформаций поверхностных слоев материала, распространяющихся на небольшую глубину. В результате возникают поля остаточных напряжений и деформаций, благоприятно влияющие на ее усталостную прочность в эксплуатационных условиях.

Особый эффект при этом достигается упрочнением зон концентрации напряжений и деформаций, ибо в большинстве конструкций именно в этих зонах раньше наступает предельное состояние и разрушение. В области концентрации напряжений и деформаций путем

ППД возможно глубокое местное пластическое деформирование материала, при котором у контура концентратора и в прилегающем к нему объеме создаются сжимающие остаточные напряжения, существенно снижающие общий уровень напряженности в эксплуатационных условиях. Таким образом, заметно уменьшается неблагоприятная роль концентрации напряжений в обеспечении прочности и долговечности конструкций.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для построения общей методики расчета был использован метод последовательных нагружений, идея которого заключается в последовательном приложении внешних нагрузок и в последовательном решении задач упругости и ползучести [4].

Процесс нагружения может быть разбит на ряд достаточно малых шагов, на каждом из которых полная деформация представлена в дифференциальной форме:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x^n &= d\varepsilon_x^{en} + d\varepsilon_x^{pn}, \dots, \\ d\gamma_x^n &= d\gamma_x^{en} + d\gamma_x^{pn}, \dots \quad (x, y, z), \end{aligned} \quad (1)$$

где верхние индексы  $e, p$  относятся к деформациям упругости и пластичности; символ  $(x, y, z)$  означает круговую перестановку. Шаги нагружения должны быть достаточно малы, чтобы значения характеристик материала, параметры пластичности в пределах этапа можно было считать постоянными. Длительность шага оценивается требуемой точностью разбиения нагрузки на шаги.

При расчете напряженно-деформированного состояния  $n$ -го шага нагружения полагаем, что результаты  $(n-1)$ -го шага полностью определяют

значения деформаций и напряжений за всю предшествующую «историю» нагружения. На расчетном шаге решаем краевую задачу упругости и пластичности при заданных приращениях внешних воздействий. При этом должны быть удовлетворены уравнения неразрывности деформаций, равновесия и краевые условия [5].

Проинтегрировав зависимости (1) в пределах расчетного этапа, приращения компонентов полной деформации представим в виде

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_x^n &= \Delta \varepsilon_x^{e n} + \Delta \varepsilon_x^{p n}, \dots, \\ \Delta \gamma_{xy}^n &= \Delta \gamma_{xy}^{e n} + \Delta \gamma_{xy}^{p n}, \dots \quad (x, y, z) \end{aligned}$$

Далее расчет сводим к установлению характера нагружения в каждой точке исследуемой конструкции. Для этого в точках определяем приращение интенсивности напряжений по формуле

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_i^n &= \frac{3}{2 \sigma_i^{(n-1)}} \left[ (\sigma_x^{(n-1)} - \sigma^{(n-1)}) \Delta \sigma_x^n + \dots \right] + \\ &+ \frac{3}{\sigma_i^{(n-1)}} \left[ \tau_{xy}^{(n-1)} \Delta \tau_{xy}^n + \dots \right], \end{aligned}$$

где  $\Delta \sigma_x^{(n-1)}, \dots, \Delta \tau_{xy}^{(n-1)}$  ... – компоненты тензора напряжений на  $(n-1)$ -м шаге нагружения;  $\sigma^{(n-1)}$  – среднее напряжение;  $\sigma_i^{(n-1)}$  – интенсивность напряжений  $(n-1)$ -го шага нагружения;  $\Delta \sigma_x^n, \dots, \Delta \tau_{xy}^n, \dots$  – приращения нормальных и касательных напряжений на  $n$ -м шаге;  $\Delta \sigma_i^n$  – приращение интенсивности напряжений по параметру нагружения. Если приращение интенсивности  $\Delta \sigma_i^n > 0$ , то в данной точке имеет место нагружение, в противном случае – разгружение. Наличие упругопластических деформаций проверяем по условиям:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_T^{n-1} &= \sigma_i(T, \varepsilon_{i*}^p) \\ \Delta \sigma_i^n &> 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\sigma_T^{n-1}(T, \varepsilon_{i*}^p)$  – мгновенный предел текучести,  $T$  – температура;  $\varepsilon_{i*}^p$  – интенсивность накопленной пластической деформации.

Полные деформации и напряжения в конце  $n$ -го шага нагружения находим по формулам, приведенным ниже:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^n &= \varepsilon_x^{n-1} + \Delta \varepsilon_x^n, \dots, \\ \gamma_{xy}^n &= \gamma_{xy}^{n-1} + \Delta \gamma_{xy}^n, \dots (x, y, z), \\ \sigma_x^n &= \sigma_x^{n-1} + \Delta \sigma_x^n, \dots, \\ \tau_{xy}^n &= \tau_{xy}^{n-1} + \Delta \tau_{xy}^n, \dots (x, y, z). \end{aligned} \quad (3)$$

На основе изложенного подхода выполнено исследование напряженного состояния в пластинах с отверстиями при их упрочнении.

Известно, что отверстия, имеющие конструктивное или технологическое назначение, являются наиболее типичными концентраторами напряжений, ответственными за ресурс и надежность многих элементов конструкций.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА

Основная идея упрочнения заключается в продавливании через обрабатываемое отверстие инструмента (дорна или шарика), диаметр рабочей части которого  $D_u$  (рис. 1, а) несколько больше диаметра отверстия  $D_0$  (рис. 1, б). В процессе упрочнения с целью центровки пластины относительно дорна применяется технологическая оснастка. На рис. 1, а приведена расчетная схема.

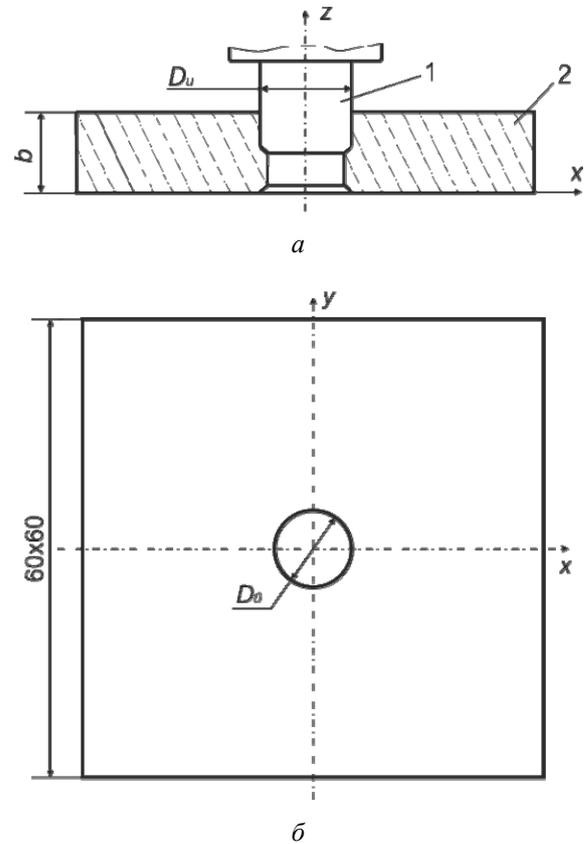


Рис. 1. Схема упрочнения отверстия:  
1 – дорнующий инструмент, 2 – пластина

В данной работе рассмотрены пластины размерами 60×60 мм, ослабленные отверстиями номинальным диаметром  $D_0 = 10$  мм, толщиной  $b = 3$  мм, выполненные из сплава ХН77ТЮР ( $\sigma_{0,2} = 610$  МПа,  $\sigma_{нч} = 1070$  МПа) со скруглениями по двум контурам отверстия (рис. 1). Численное решение задачи выполнено методом конечных элементов [5] с применением программного пакета DEFORM 3D.

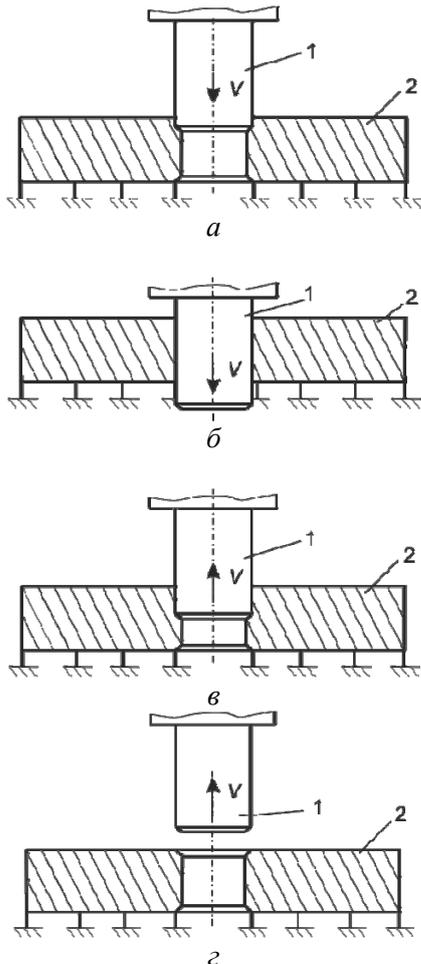


Рис. 2. Этапы упрочнении отверстия:  
1 – дорнующий инструмент, 2 – пластина

В процесс дорнования выделим два основных этапа упрочнения. На первом из них происходит ввод в отверстие пластины дорнующего инструмента, при этом осуществляется контактное взаимодействие дорна с обрабатываемой поверхностью (рис. 2, а), по ходу движения дорна зона контакта увеличивается. По завершении движения инструмента, взаимодействие осуществляется по всей зоне контакта инструмента с поверхностью пластины (рис. 2, б).

На втором, завершающем этапе, происходит вывод инструмента из отверстия. При движении дорна меняется зона контактного взаимодействия с инструментом, и на участках, вышедших из взаимодействия, происходит разгрузка (рис. 2, в). По завершении вывода дорна формируются поля остаточных напряжений и деформаций по всему объему пластины (рис. 2, г).

Было исследовано влияние предварительной технологической подготовки контура отверстия пластины на величину остаточных напряжений при упрочнении (снятие фаски по обоим контурам отверстия, рис. 1, б; без снятия фаски, рис. 3, а; со снятием фаски по контуру отверстия со стороны ввода дорна, рис. 3, б).

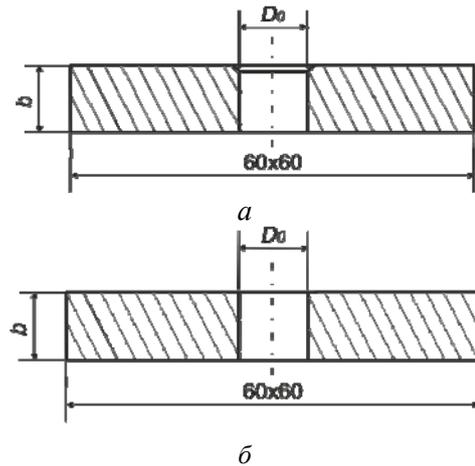


Рис. 3. Пластина с различными видами технологической обработки контура отверстия

На рис. 4 показан характер распределения осевых остаточных сжимающих напряжений по объему пластины.

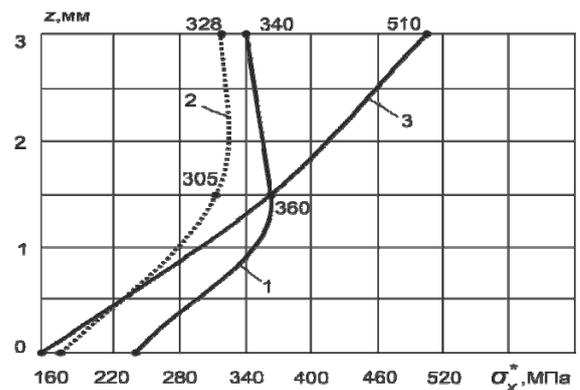
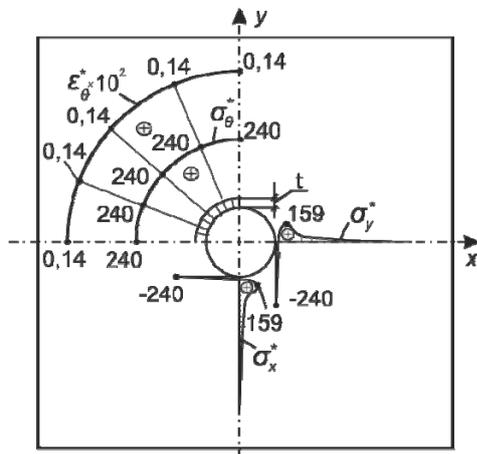


Рис. 4. Характер распределения осевых остаточных сжимающих напряжений по объему пластины: кривая 1 – фаска снята с обоих контуров отверстия; кривая 2 – фаска снята со стороны ввода дорна в отверстие; кривая 3 – без снятия фаски

Проанализировав характер распределения осевых остаточных сжимающих напряжений по объему пластины, отметим, что при первом (кривая 1) и втором (кривая 2) варианте технологической обработки контура отверстия, распределение осевых остаточных напряжений имеет однородный характер, и диапазон разброса значений составляет 100 МПа и 150 МПа соответственно. При отсутствии предварительной обработки контура отверстия (кривая 3) диапазон разброса значений достигает 350 МПа. Также необходимо отметить, что наибольший износ инструмента наступает при упрочнении пластины с отверстием без предварительной обработки контура. На основании этого в качестве исследуемого объекта была выбрана пластина с фаской, снятой с обоих контуров отверстия (рис. 1, а).

На основании результатов расчета в качестве примера (рис. 5) показано распределение полей остаточных осевых, контурных напряжений и деформаций в пластине толщиной  $b = 3$  мм под действием упрочняющего инструмента, имеющего диаметр  $D_u = 10,06$  мм.

Анализ показывает, что в теле пластины возникают пластические деформации, распространяющиеся на глубину  $t = 0,41$  мм в поверхностном слое пластины. Существенно, что в зоне концентрации остаточные напряжения являются сжимающими и равны 240 МПа, а относительные деформации — растягивающие порядка  $0,14 \times 10^{-2}$ . Растягивающие остаточные напряжения действуют в области однородного напряженного состояния, их величина несколько ниже сжимающих и достигает 159 МПа (рис. 5).



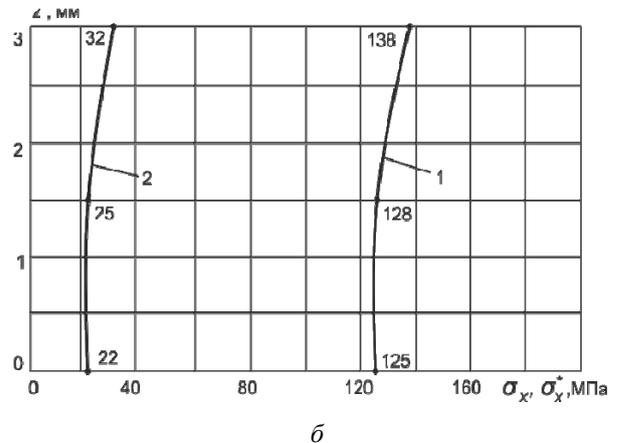
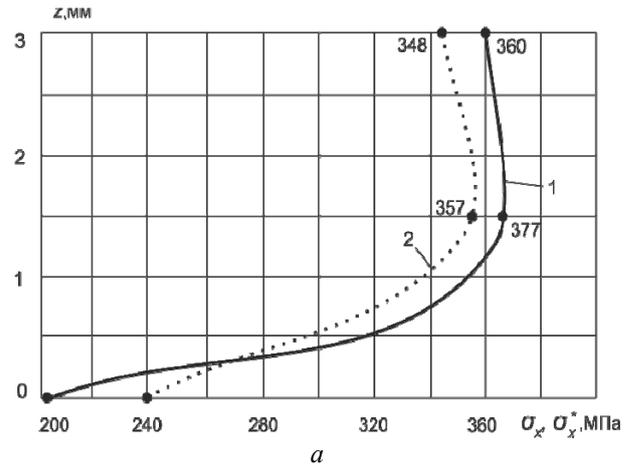
**Рис. 5.** Распределение полей остаточных осевых ( $\sigma_{x^*}, \sigma_{y^*}$ ) и контурных напряжений ( $\sigma_{\theta^*}$ ) и деформаций  $\varepsilon_{\theta^*}$

Подобный характер распределения остаточных напряжений наблюдается и при упрочнении отверстий инструментами других диаметров.

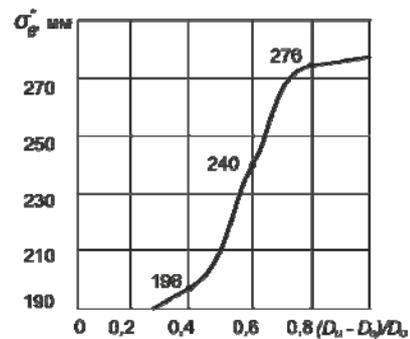
Ниже приведены поля распределения максимальных осевых сжимающих (рис. 6, а) и растягивающих напряжений (рис. 6, б), по объему пластины в конце первого (кривая 1) и второго этапа упрочнения (кривая 2).

Из данных зависимостей видно, что наибольшие сжимающие напряжения (рис. 6, а) возникают на срединном слое пластины, а наибольшие растягивающие — на поверхностном (рис. 6, б). Это вызвано течением деформированного слоя металла в процессе ввода и вывода инструмента.

Для расчета и проектирования процессов упрочнения важно располагать зависимостями уровня кольцевых остаточных напряжений.



**Рис. 6.** Поля распределения максимальных осевых и остаточных сжимающих, растягивающих напряжений



**Рис. 7.** Зависимость кольцевых остаточных сжимающих напряжений ( $\sigma_{\theta^*}$ ) от параметра инструмента

Исследование показало, что остаточные напряжения возникают, когда параметр инструмента  $(D_u - D_0) / D_0$  достигает значения порядка 0,3 % ( $D_u = 10,036$  мм). Дальнейшее его увеличение сопровождается интенсивным ростом остаточных напряжений (рис. 7).

При значениях параметра инструмента свыше 1,0–1,5% эффект упрочнения снижается

Рис. 8 и рис. 9 иллюстрируют зависимость глубины распространения пластических де-

формаций  $t$  и изменения диаметра  $\Delta D_0$  от  $(D_u - D_0)/D_0$  после упрочнения.

Видно, что с увеличением размеров инструмента наблюдается монотонный рост значений  $t$  и  $\Delta D_0$ .

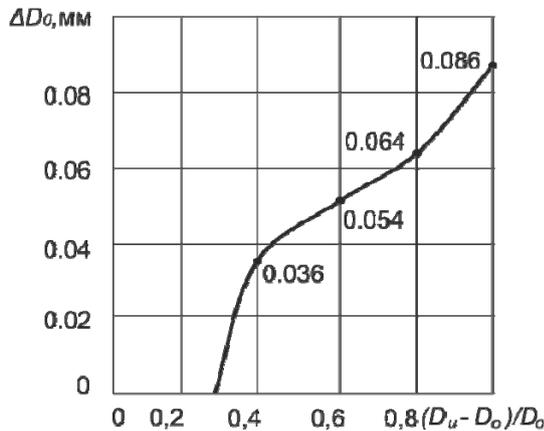


Рис. 8. Зависимость изменения ( $\Delta D_0$ ) диаметра отверстия после упрочнения

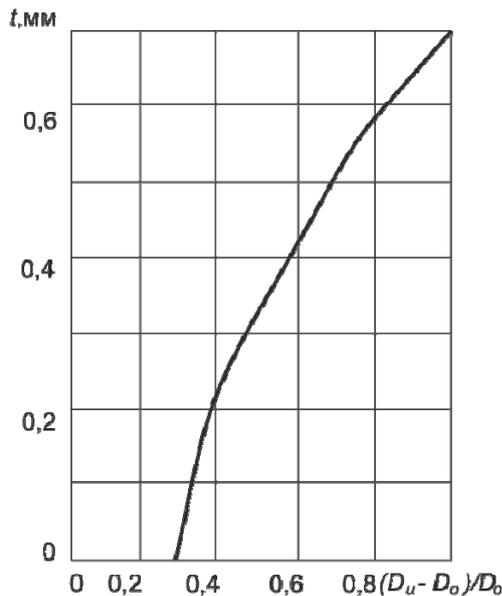


Рис. 9. Зависимость глубины ( $t$ ) проникновения пластических деформаций после упрочнения

### ВЫВОД

Приведенные результаты убедительно свидетельствуют о работоспособности изложенного подхода к моделированию технологических процессов упрочняющей обработки отверстий с учетом конструктивно-технологических факторов, а также об эффективности алгоритмов его численной и программной реализации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мавлютов Р. Р.** Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. М.: Наука, 1981.
2. **Братухин А. Г., Иванов Ю. Л.** Современные технологии авиастроения. М.: Машиностроение, 1999.
3. **Дегтярев В. П.** Деформации и разрушение в высоконапряженных конструкциях. М.: Машиностроение, 1987.
4. **Биргер И. А.** Общие алгоритмы решения задач упругости, пластичности и ползучести // Успехи механики деформируемых сред. М.: Наука, 1976.
5. **Ильюшин А. А.** Пластичность. Основы общей математической теории. М.: АН СССР, 1963.
6. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
7. **Воробьев Ю. А., Воронько В. В.** Перспективные устройства для реализации процесса дорнования отверстий // Авиационно-космическая техника и технология. 2004. №3 (11). С.28–32.
8. **Смелянский В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002.

### ОБ АВТОРАХ

**Жернаков Владимир Сергеевич**, профессор, зав. каф. сопр. мат. УГАТУ. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепл. двиг. ЛА (УГАТУ, 1992). Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.

**Мардимасова Тамара Николаевна**, доцент той же каф. Дипл. инж.-электромеханик по авиац. приборам (УАИ, 1971), канд. техн. наук по динамике и прочности (УАИ, 1977). Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.

**Арсланов Марат Рашитович**, аспирант той же каф. Дипл. инж.-мех по оборуд. и техн. свар. произва (УГАТУ, 2010). Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.