

УДК 621.822.6

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСЛЕ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Р. Р. МАВЛЮТОВ*, **В. С. КУЛИКОВ**, **Т. Н. МАРДИМАСОВА****

*Институт механики УНЦ РАН

**Факультет авиационных двигателей УГАТУ
Тел: (3472) 22 43 31 E-mail: julia@anrb.ru

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 технических 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; теория пластичности; моделирование процессов

Одним из наиболее эффективных технологических методов повышения несущей способности и долговечности элементов конструкций является их отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД). На практике применяются различные варианты такой обработки: обкатывание шариками, роликами, дорнование, опрессовка, алмазное выглаживание, чеканка, обдувка дробью и т. д. [1–9].

Суть рассматриваемого метода обработки 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 вблизи поверхности детали возникают поля остаточных напряжений и деформаций, благоприятно влияющие на ее усталостную и длительную прочность в эксплуатационных условиях.

Кроме того, в ходе обработки ППД в поверхностном слое детали возникает деформационное упрочнение материала, меняется его микроструктура, улучшаются физико-механические характеристики, растет прочность. Процесс местного пластического деформирования поверхности сопровождается уменьшением ее шероховатости, что также способствует повышению прочности элементов конструкций.

Важную роль в механике упрочнения играют тепловые процессы, сопровождающие обработку ППД [3]. При значительном трении в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, а также при больших степенях пластической деформации существенная доля энергии расходуется на нагрев обрабатываемой детали. Возникают температурные градиенты и напряжения, способствующие росту пластических деформаций. Кроме того, температура играет немаловажную роль в кинетике структурных и фазовых

превращений материала, в том числе и в его разупрочнении [3].

Многочисленные эксперименты [3–7] показывают, что доминирующее влияние на повышение усталостной, малоцикловой и длительной прочности деталей, упрочненных ППД, оказывают характер распределения и уровень остаточных напряжений и деформаций, полученных в результате обработки. Благоприятное поле остаточных напряжений и деформаций, суммируясь с эксплуатационным, может резко повысить несущую способность и долговечность.

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 [8]. Таким образом, заметно уменьшается неблагоприятная роль концентрации напряжений в обеспечении прочности и долговечности конструкций.

В настоящее время эффективность того или иного вида упрочнения деталей ППД, как правило, определяется экспериментальным путем. Меняя технологические режимы деформирования поверхности, устанавливают влияние конструктивных и технологических факторов на показатели работоспособности конструкций, разрабатывают рациональные режимы обработки. Характер распределения остаточных напряжений, качество поверхностного слоя и их влияние на прочность конструкций оцениваются путем трудоемких и дорогостоящих испытаний.

Проблема повышения надежности и долговечности машиностроительных конструкций актуальна и практически значима, поэтому большой научный и прикладной интерес представляет моделирование процессов упрочнения деталей машин, изучение полей технологических остаточных напряжений и деформаций, а также оценка их влияния на напряженно-деформированное состояние конструкций в условиях эксплуатации. Подчеркнем, что детальное исследование напряженно-деформированного состояния и концентрации напряжений в элемен-

тах конструкций на стадии изготовления и учет их при оценке НДС на стадии эксплуатации являются основой построения наиболее перспективной методологии расчета с учетом технологической наследственности.

В настоящей работе излагается один из подходов к решению рассматриваемой проблемы на примере упрочнения дорнованием отверстий [9]. Известно, что отверстия, имеющие конструктивное или технологическое назначение, являются наиболее типичным концентратором напряжений, ответственным за разрушение многих элементов конструкций.

Главная цель моделирования на этапе проектирования конструкции и подготовки ее производства — сравнение эффективности различных методов упрочнения ППД, выбор наиболее рационального из них и построение технологического процесса реализации. Решение этой задачи требует рассмотрения «истории» термомеханического поведения упрочняемых деталей, начиная с изготовления и кончая эксплуатацией, и построения на этой основе методики расчета процессов деформирования конструкции на всех этапах жизненного цикла.

Анализируя различные технологические схемы упрочнения элементов конструкций в условиях квазистатического ППД [1–7], характер их нагружения и деформирования, можно выделить четыре основных этапа.

На первом из них производится обработка поверхности, при которой происходит контактное взаимодействие инструмента с обрабатываемой деталью, пластическое деформирование и нагрев поверхности.

На втором, завершающем обработку, этапе воздействие инструмента прекращается, происходит разгрузка и охлаждение готовой конструкции. Формируются поля остаточных напряжений и деформаций, а также структура и качество поверхностного слоя материала.

К третьему этапу можно отнести период хранения изделия, когда возможна релаксация и перераспределение остаточных напряжений, старение материала и изменение его структуры вследствие физико-химических процессов.

На последнем этапе происходит деформирование конструкции под действием эксплуатационных нагрузок и температур. Общий характер напряженности на этой стадии в значительной степени определяется предшествующей «историей» нагружения и деформации конструкции.

С расчетной точки зрения существенно, что в процессе упрочнения поверхности в конструкции появляются значительные по величине пластические деформации, а ее последующее деформирование включает этапы активного нагружения, разгрузки и повторного нагружения, способного вызвать вторичные пластические деформации. С позиций механики деформируемого твердого тела такой процесс, строго говоря, относится к классу сложного, непропорционального нагружения. Последнее существенно усложняет его описание, требуя привлечения достаточно общих теорий пластичности, например, теории процессов нагружения и деформирования в многомерном пространстве напряжений и деформаций. Анализ, однако, показывает, что даже при наличии экспериментально-программного комплекса типа «СН-ЭВМ» практическая реализация рассматриваемого подхода остается весьма проблематичной. Известны лишь немногочисленные примеры решения подобных задач [10].

Учитывая изложенное, в настоящей работе моделирование процессов упрочнения ППД построено на основе технических теорий пластичности и их модификаций, а также специальных алгоритмов, обеспечивающих удовлетворительное приближенное описание процессов сложного нагружения. Принята следующая общая схема расчета.

Типовой процесс образования технологических остаточных напряжений и деформаций представлялся в виде двух основных стадий. Первая стадия состояла в нагружении и деформировании обрабатываемой детали под действием инструмента, вторая - представляла собой разгрузку и охлаждение готовой конструкции. Весь этот процесс обработки разбивался на последовательность расчетных этапов, шаг которых (по времени или нагрузке) выбирался таким, чтобы нагружение на расчетном этапе можно было считать простым с неизменными упругопластическими характеристиками материала в пределах этого этапа.

На каждом n -м этапе решалась краевая упругая или упругопластическая задача для приращений перемещений $\{\Delta_n u\}$, деформаций $\{\Delta_n \varepsilon\}$ и напряжений $\{\Delta_n \sigma\}$. В качестве физических уравнений использовались соотношения деформационной теории пластичности, которые в приращениях имели вид

$$\{\Delta_n e\} = \frac{1 + \nu}{E} \Psi \{\Delta_n s\}, \quad (1)$$

где $\{\Delta_n e\}$ и $\{\Delta_n s\}$ — приращения компонентов девиаторов деформаций и напряжений

соответственно; E, ν — параметры упругости; Ψ — параметр пластичности, определяемый зависимостью

$$\Psi = \frac{3E}{2(1 + \nu)} \cdot \frac{\varepsilon_i^{(n)}}{\sigma_i^{(n)}}, \quad (2)$$

в которой $\varepsilon_i^{(n)}$ и $\sigma_i^{(n)}$ — интенсивности деформаций и напряжений для расчетного этапа нагружения. В первом приближении они принимались по результатам расчета предыдущего $(n - 1)$ -го этапа.

При расчете этапа полагали, что результаты расчета предыдущего $(n - 1)$ -го этапа полностью определяют напряженно-деформированное состояние тела за всю предшествующую «историю» нагружения. В первом приближении считалось, что характер нагружения и параметры упругости на рассматриваемом этапе сохраняются такими же, как и на предыдущем.

Методом конечных элементов решалась сформулированная выше упругопластическая задача. Линеаризация ее осуществлялась методом переменных параметров упругости. В результате находились приращения перемещений $\{\Delta_n u\}$, деформаций $\{\Delta_n \varepsilon\}$ и напряжений $\{\Delta_n \sigma\}$.

Далее устанавливался характер нагружения. С этой целью предварительно рассчитывалось приращение интенсивности напряжений по параметру нагружения. Расчетное уравнение получали, исходя из зависимости

$$d\sigma_i = \frac{\partial \sigma_i}{\partial \sigma_x} d\sigma_x + \frac{\partial \sigma_i}{\partial \sigma_y} d\sigma_y + \dots + \frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau_{zx}} d\tau_{zx}, \quad (3)$$

которая в конечных приращениях имеет вид

$$\Delta_n \sigma_i = \frac{3 \left[(\sigma_x^{(n-1)} - \sigma^{(n-1)}) \sigma_x^{(n-1)} + \dots \right]}{2\Delta \sigma_i^{(n-1)}} + \frac{3 \left[\tau_{xy}^{(n-1)} \Delta \tau_{xy}^{(n)} + \dots \right]}{\sigma_i^{(n-1)}}, \quad (4)$$

где $\sigma^{(n-1)} = (\sigma_x^{(n-1)} + \sigma_y^{(n-1)} + \sigma_z^{(n-1)})/3$ — среднее напряжение, соответствующее $(n-1)$ -му этапу нагружения.

Активное нагружение имеет место при интенсивности напряжений в рассматриваемой точке $\Delta_n \sigma_i > 0$, в противном случае — разгрузка.

Если характер нагружения на n -м этапе в исследуемой точке остается таким же, как и

на предыдущем $(n - 1)$ -м этапе, то корректировки параметров упругости не требуется. В случае, когда на n -м этапе предполагалось нагружение, а приращение интенсивности напряжений $\Delta_n \sigma_i < 0$, то расчет этапа производился заново в предположении, что в рассматриваемой точке имеет место упругое деформирование.

Разгрузка во всех случаях считается упругой, а нагружение может быть упругим или упругопластическим. Наличие упругопластических деформаций проверялось по условиям

$$\sigma_i^{(n)} \geq \sigma_T^{(n)} (\varepsilon_{i*}^{p(n)}), \quad \Delta_n \sigma_i > 0, \quad (5)$$

где $\sigma_T^{(n)}$ — мгновенный предел текучести, соответствующий накопленной деформации пластичности $\varepsilon_{i*}^{p(n)}$. При выполнении этих условий имеет место рост пластических деформаций, иначе — упругое деформирование.

В результате описанной процедуры находились окончательные значения приращений деформаций $\{\Delta_n \varepsilon\}$ и напряжений $\{\Delta_n \sigma\}$, а затем — их полные значения

$$\begin{aligned} \{\varepsilon\}^{(n)} &= \{\varepsilon\}^{(n-1)} + \{\Delta_n \varepsilon\}; \\ \{\sigma\}^{(n)} &= \{\sigma\}^{(n-1)} + \{\Delta_n \sigma\} \end{aligned} \quad (6)$$

в конце рассматриваемого этапа нагружения.

Аналогичным образом строился расчет последующих этапов. Технологические остаточные напряжения и деформации находились по результатам расчета последнего этапа нагружения (разгрузки).

Анализ показал, что в некоторых видах обработки ППД реализуется простое (пропорциональное) нагружение конструкции. В таких случаях остаточные напряжения и деформации могут быть найдены по теореме о разгрузке [11, 12].

На основе изложенных алгоритмов выполнено моделирование процессов упрочнения ППД зон концентрации напряжений около отверстий методом дорнования [9].

Основная идея этого метода заключается в продавливании через обрабатываемое отверстие инструмента (дорна), диаметр рабочей части которого (D) несколько больше диаметра инструмента (рис. 1). Процесс обработки может происходить без вращения инструмента (схема I) или с его вращением (схема II).

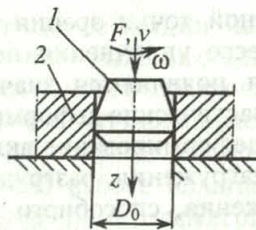


Рис. 1. Схема дорнования: 1 — дорн; 2 — обрабатываемая деталь

Рассмотрены пластины размерами 60×60 мм, ослабленные отверстиями номинальным диаметром $D_0 = 10$ мм, выполненные из материала Д16Т ($\sigma_T = 370$ МПа, $\sigma_b = 540$ МПа), коэффициент Пуассона $\nu = 0,33$, модуль упругости $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа.

В расчетной схеме предполагалось, что нагрузки и деформации пластины в направлении оси инструмента (z) невелики и пластина испытывает плоское напряженное состояние. Расчетные схемы при обработке отверстия по схемам I и II приведены на рис. 2.

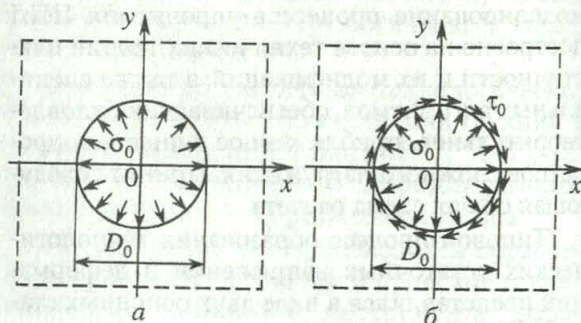


Рис. 2. Расчетные схемы I (a) и II (b) процесса дорнования

Сначала были выполнены исследования при обработке отверстия по схеме I. Результаты исследований приведены на рис. 2. Обнаружено, что пластические деформации на контуре отверстия появляются лишь при диаметрах инструмента $D_u \geq 10,036$ мм. Они одинаковы для всех точек контура отверстия и углубляются в тело пластины по мере увеличения диаметра инструмента.

На рис. 3 в качестве примера показано напряженно-деформированное состояние пластины в характерном сечении Ox на j -й части при обработке ее инструментом диаметром $D_u = 10,06$ мм, что соответствует контурному давлению $\sigma_0 = 300$ МПа. При это в теле пластины возникают по контуру отверстия пластические деформации глубиной пространства порядка 0,9 мм (j -я часть зоны пластичности заштрихована на рис. 4, а).

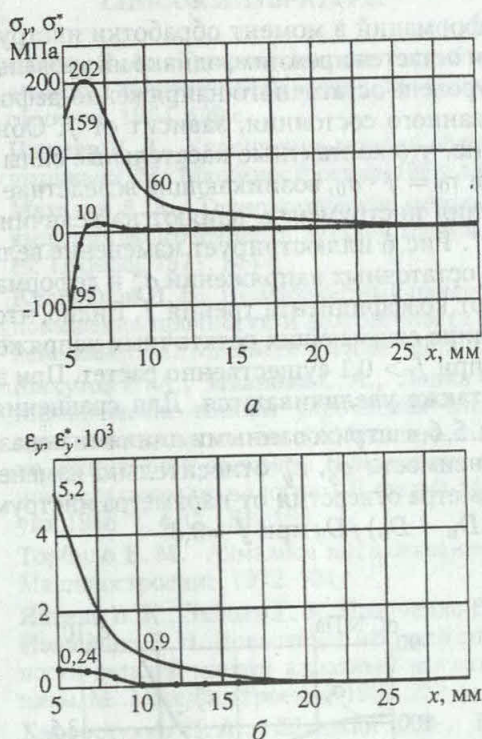


Рис. 3. Распределение осевых напряжений (а) и деформаций (б) в сечении $0x$ при обработке отверстий по схеме I ($D_u = 10,06$ мм): — — осевые напряжения σ_y и деформации ϵ_y ; • — остаточные напряжения σ_y^* и деформации ϵ_y^*

Анализ результатов показал, что осевые напряжения σ_y и деформации ϵ_y (рис. 3) распределены неравномерно. Максимальные растягивающие $\sigma_y = 202$ МПа смещены в глубь пластины к границе между упругой и упругопластической зонами, в то время как их значения на контуре отверстия ниже и достигают 159 МПа. Заметим, что осевые деформации ϵ_y максимальны на контуре отверстия и равны $0,52 \cdot 10^{-2}$. По мере удаления в тело пластины σ_y и ϵ_y падают и на расстоянии от отверстия порядка 15 мм близки к 0. Контурные напряжения σ_θ и деформации ϵ_θ практически одинаковы во всех точках контура (рис. 4).

По окончании процесса обработки и разгрузки пластины, вследствие неоднородности деформаций, в ней возникают остаточные напряжения и деформации. Остаточное напряженно-деформированное состояние характеризуется наличием осевых и контурных напряжений (σ_y^* , σ_θ^*) и деформаций (ϵ_y , ϵ_y^*), эпюры распределения которых показаны на рис. 3, 4 линиями с кружочками.

Существенно, что в зоне концентратора напряжений остаточные напряжения σ_y^* сжимающие и равны 95 МПа, а деформации $\epsilon_y^* =$

$= 0,24 \cdot 10^{-3}$ — растягивающие. Растягивающие σ_y^* значительно меньше сжимающих.

Подобный характер распределения полей напряжений и деформаций наблюдается и при упрочнении инструментом отверстий других диаметров.

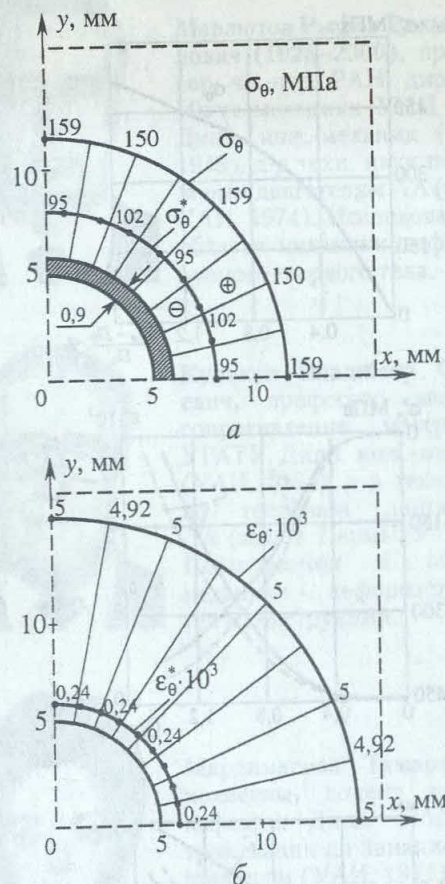


Рис. 4. Контурные напряжения (а) и деформации (б) при обработке отверстия по схеме I ($D_u = 10,06$ мм): — — контурные напряжения σ_θ и деформации ϵ_θ ; • — остаточные напряжения σ_θ^* и деформации ϵ_θ^*

Для расчета и проектирования процессов упрочнения важно располагать зависимостями уровня кольцевых остаточных напряжений и деформаций, глубины упрочненного слоя, изменения диаметра отверстия от размеров инструмента. Установлено, что остаточное напряженно-деформированное состояние в пластине возникает, когда параметр инструмента $(D_u - D_0)/D_0$ достигает величины порядка 0,36% ($D_u = 10,036$ мм); при этом контактное давление меняется линейно (рис. 5, а). Дальнейшее увеличение $(D_u - D_0)/D_0$ сопровождается интенсивным ростом остаточных напряжений σ_y^* и деформаций ϵ_y^* (рис. 5, б). Видно, что

характер изменения σ_0 становится нелинейным. Рис. 5, в иллюстрирует зависимость глубины распространения пластических деформаций t^* и относительного диаметра $\Delta D_0/D_0$ от $(D_u - D_0)/D_0$.

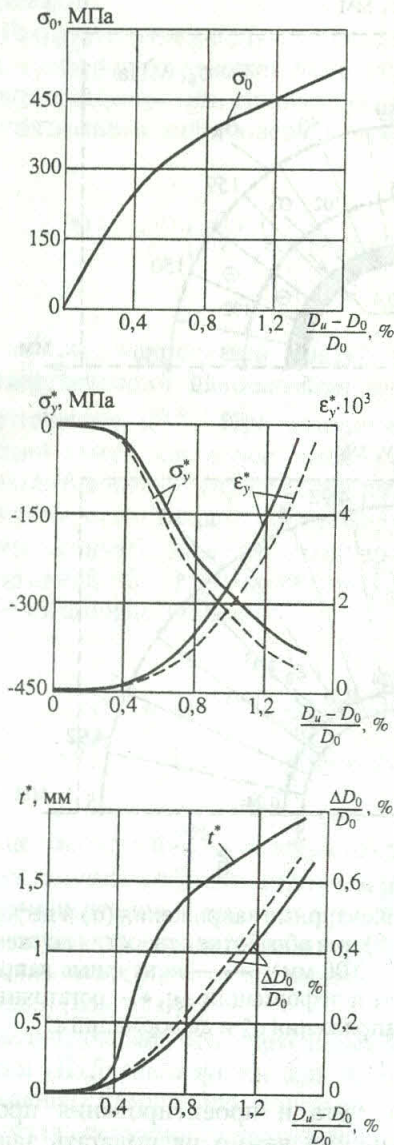


Рис. 5. Изменение контактного давления σ_0 (а), максимальных сжимающих остаточных напряжений σ_y^* и деформаций ϵ_y^* (б), глубины упрочненного слоя t^* и относительного диаметра отверстия $\Delta D_0/D_0$ (в) от параметра инструмента $(D_u - D_0)/D_0$: сплошные линии — $f = 0$; пунктирные — $f = 0,3$

Исследовано влияние коэффициента трения f на поля остаточных напряжений и деформаций при обработке отверстия по схеме II. Характер распределения напряжений и

деформаций в момент обработки инструментом остается прежним, однако их уровень, как и уровень остаточного напряженно-деформированного состояния, зависит от f . Обнаружено, что контактные касательные силы трения $\tau_0 = f \cdot \sigma_0$, возникающие вследствие вращения инструмента, влияют на величину σ^* и ϵ^* . Рис. 6 иллюстрирует изменение величины остаточных напряжений σ_y^* и деформаций ϵ_y^* от коэффициента трения f . Видно, что величина сжимающих остаточных напряжений σ_y^* при $f > 0,1$ существенно растет. При этом ϵ_y^* также увеличиваются. Для сравнения на рис. 5, б, в штрихованными линиями показаны зависимости σ_y^* , ϵ_y^* относительно изменения диаметра отверстия от параметра инструмента $(D_u - D_0)/D_0$ при $f = 0,3$.

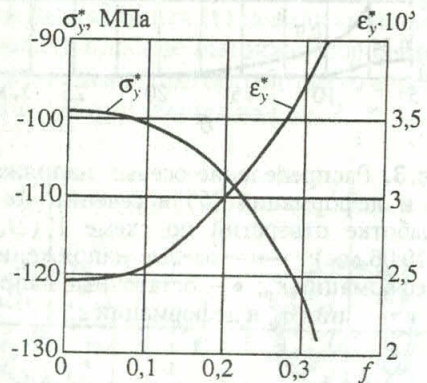


Рис. 6. Изменение величины остаточных напряжений σ_y^* и деформаций ϵ_y^* от коэффициента трения f

ВЫВОДЫ

Приведенные результаты убедительно свидетельствуют о работоспособности изложенного подхода к моделированию технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки элементов конструкций, а также об эффективности алгоритмов его численной и программной реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сателъ Э. А. Технологические способы повышения долговечности машин. М.: Машиностроение, 1964. 439 с.
2. Папшев Д. Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками. М.: Машиностроение, 1968. 132 с.
3. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев: Техника, 1971. 144 с.
4. Кудрявцев И. В. Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин. М.: Машиностроение, 1969. 100 с.
5. Махутов Н. А., Иванова С. А., Левин О. А. Механические основы упрочнения физико-химическими методами // Механика и научно-технический прогресс. Приложение механики к задачам технологии: Сб. статей. М.: Наука, 1988. Т. 4. С. 181–195.
6. Торбило В. М. Алмазное выглаживание. М.: Машиностроение, 1972. 104 с.
7. Яценко В. К., Зайцев Г. З., Притченко В. Ф., Иващенко Л. И. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.
8. Хворостухин Л. А., Шишкин С. В., Ковалев А. П., Ишмаков Р. А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. М.: Машиностроение, 1988. 144 с.
9. Поскряков Ю. Г. Дорнование отверстий. М.: Машиностроение, 1961. 112 с.
10. Бабамурадов К. Ш., Ильюшин А. А., Кабулов В. К. Метод СН-ЭВМ и его приложения к задачам теории пластичности. Ташкент: ФАН УзССР, 1987. 288 с.
11. Ильюшин А. А. Некоторые вопросы теории пластических деформаций // Прикладная математика и механика. 1943. Т. 7, вып. 4. С. 245–272.
12. Генки Г. К теории пластических деформаций и вызываемых ими в материале остаточных напряжений // Теория пластичности. М.: Изд. иностр. лит., 1948. С. 115–135.

ОБ АВТОРАХ



Мавлютов Рыфат Рахматулович (1926–2000), профессор, чл.-кор. РАН, директор Ин-та механики УНЦ РАН. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1949), д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (защ. в КАИ, 1974). Исследования в области механики деформируемого твердого тела.



Куликов Владимир Сергеевич, профессор кафедры сопротивления материалов УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1964), д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (защ. в ПермГТУ, 1994). Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.



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