

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**Пермский национальный исследовательский политехнический
университет**

Факультет прикладной математики и механики
Кафедра «Динамика и прочность машин»
Направление подготовки: 15.04.03 Прикладная механика
Направление (профиль) образовательной программы:
Динамика и прочность машин, конструкций и механизмов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему Особенности распределения остаточных напряжений
и перемещений в упругих телах, вызванных их поверхностной обработкой

Студент Виндокуров Илья Владимирович

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на 38 страницах
2. Графическая часть состоит из 19 рисунков

Допускается к защите

Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор

_____ В.П. Матвееenko

« 21 » _____ июня 2019 г.

Регистрационный номер _____

Руководитель ВКР

_____ (И. Э. Келлер)

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**Пермский национальный исследовательский политехнический
университет**

Кафедра «Динамика и прочность машин»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

_____ В.П. Матвеевко

« 5 » _____ июня _____ 2019 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Фамилия, И. О. Виндокуров Илья Владимирович

Факультет прикладной математики и механики Группа ДПМ-17-1м

Начало выполнения работы

Контрольные сроки просмотра работы кафедрой

Сроки представления на рецензию

Защита работы на заседании ГЭК 27.06.2019

1. Наименование темы Особенности распределения остаточных напряжений и перемещений в упругих телах, вызванных их поверхностной обработкой
2. Исходные данные к работе
3. Содержание пояснительной записки
 - а) Математическая постановка задачи и ее численная формулировка;
 - б) Исследование стрелы прогиба полосы в зависимости от ее ширины;
 - в) Исследование особенностей распределения остаточных напряжений в пластине с локальной областью поверхности, подвергнутой лазерной проковке;
 - г) Исследование особенностей распределения остаточных напряжений вблизи кромки лопатки;
 - д) Заключение;
4. Дополнительные указания _____

5. Основная литература

а) Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232с.

Руководитель выпускной квалификационной работы магистра

д.ф.-м.н., профессор кафедры ДПМ

И. Э. Келлер

Задание получил

И. В. Виндокуров

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

№	Наименование этапа	Объем, %	Сроки выполнения		Приме чание
			начало	конец	
1	Разработка основных разделов диссертации	75	05.06.19	14.06.19	
2	Оформление диссертации	15	15.06.19	17.06.19	
3	Разработка и оформление иллюстративного материала к защите диссертации	3	18.06.19	19.06.19	
4	Представление диссертации на проверку и отзыв научного руководителя	5	16.06.19	18.06.19	
5	Представление работы заведующему кафедрой	1	20.06.19		
6	Защита на заседании ГЭК	1	27.06.19	27.06.19	

Научный руководитель работы

(И. Э. Келлер)

« 5 » _____ июня _____ 2019 г.

Реферат

Современные регламенты проектирования авиационного двигателя содержат требования прямого учета в расчетах на прочность поверхностного слоя тангенциальных сжимающих остаточных напряжений. Данный слой обычно наводится процессом холодной обработки детали путем бомбардировки участка ее поверхности мелкими стальными шариками. Упругость материала стремится восстановить начальную форму детали вблизи ее поверхности, что приводит к образованию в поверхностном слое поля тангенциальных сжимающих остаточных напряжений и необходимого для равновесия поля остаточных напряжений в детали вне этого слоя. В работе численно исследуются поля остаточных напряжений и перемещений в некоторых задачах, важных с точки зрения приложений к проектированию перспективных технологий поверхностной обработки ответственных деталей авиационного двигателя и методов разрушающего контроля остаточных напряжений.

Целью данной работы является:

1. Исследование прогиба пластины, поверхностно упрочненной в зависимости от ее ширины.
2. Исследование качественного и количественного сравнения распределения остаточных напряжений по глубине в однородно и неоднородно обработанной пластине.
3. Исследование концентрации растягивающих напряжений в поверхностно обработанном затупленном клине.

Существует инженерная проблема, с которой сталкиваются при производстве. Во время работы с различными пластинами возникают вопросы, как правильно подобрать ширину для различных прочностных испытаний и как ширина влияет на прогиб. Оказалось что от ширины прогиб не меняется если его мерить по длине в центральном сечении. Численное моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS APDL. Численный расчет показал, что пластины выгибаются в направлении границы, вблизи которой заданы пластические деформации. По данным численного эксперимента была построена зависимость стрелы прогиба от ширины пластины. Увеличение долговечности и надёжности лопаток в двигателе возможна различными способами, одним из которых является поверхностное упрочнение. В связи

со сложной геометрией и высокими требованиями к качеству поверхности имеется очень ограниченная номенклатура способов поверхностного пластического деформирования. Одним из таких методов является бомбардировка участка поверхности мелкими стальными шариками. Такая обработка приводит к пластическому растяжению материала в касательной плоскости к обрабатываемой поверхности в тонком приповерхностном слое. Заданный источник пластических деформаций создает поле сжимающего напряжения по контуру, а также поле растягивающего напряжения во внутренней области затупленного клина. Сходимость по максимальным напряжениям показала, что количество элементов были подобраны верно для оптимального времени расчета и точности результатов. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Подтверждена независимость стрелы прогиба полосы, подвергнутой односторонней однородной поверхностной обработке пластическим деформированием, от ее ширины. Данный факт важен при лабораторном исследовании остаточных напряжений методом Н.Н.Давиденкова, в особенности нестандартных образцов, разработке нового оборудования для этих задач.
2. Показана возможность оценки глубины и максимальной величины остаточных напряжений с использованием обработки части поверхности контрольной пластины. Ошибка по максимальной величине остаточных напряжений не превышает 8%, при этом для частично обработанной пластины удовлетворяется с хорошим приближением интегральное условие равновесия. Данный результат обосновывает упрощенную методику исследования параметров профиля остаточных напряжений, наведенных различными технологиями обработки.
3. Показано образование опасного концентратора растягивающих напряжений вблизи кромки затупленного клина при его поверхностной обработке пластическими деформациями, способного приводить к пластическому разрыхлению и образованию усталостных трещин в данной области.

Оглавление

	Стр.
Введение	9
Глава 1. Математическая постановка задачи и ее численная формулировка	11
Глава 2. Исследование стрелы прогиба полосы в зависимости от ее ширины	14
2.1 Постановка задачи	14
2.2 Численное моделирование в программном комплексе ANSYS APDL	17
2.3 Результаты численного решения	18
2.4 Вывод по главе 2	20
Глава 3. Исследование особенностей распределения остаточных напряжений в пластине с локальной областью поверхности, подвергнутой лазерной проковке	21
3.1 Постановка задачи	21
3.2 Численное моделирование в программном комплексе ANSYS APDL	23
3.3 Результаты численного решения	25
3.4 Вывод по главе 3	27
Глава 4. Исследование особенностей распределения остаточных напряжений вблизи кромки лопатки	28
4.1 Постановка задачи	28
4.2 Численное моделирование в программном комплексе ANSYS APDL	29
4.3 Результаты численного решения	31
4.4 Вывод по главе 4	33

	Стр.
Заключение	34
Список литературы	35
Список рисунков	38

Введение

Современные регламенты проектирования авиационного двигателя содержат требования прямого учета в расчетах на прочность поверхностного слоя тангенциальных сжимающих остаточных напряжений [1]. Данный слой обычно наводится процессом холодной обработки детали путем бомбардировки участка ее поверхности мелкими стальными шариками. Удар каждой дробинки оставляет на поверхности микроскопическую ямку и в целом покрытие такими ямками приводит к пластическому растяжению материала в касательной плоскости к обрабатываемой поверхности в тонком приповерхностном слое (при обработке пластины в умеренном количестве это ведет к ее изгибу с выпуклостью со стороны обработанной поверхности [2]).

Упругость материала стремится восстановить начальную форму детали вблизи ее поверхности, что приводит к образованию в поверхностном слое поля тангенциальных сжимающих остаточных напряжений и необходимого для равновесия поля остаточных напряжений в детали вне этого слоя. Поскольку усталостное и коррозионное разрушение, водородное охрупчивание, разрушение вследствие износа, выкрашивания, образования задиров и кавитационной эрозии деталей машин начинается с поверхности, такая ее обработка способствует увеличению их ресурса.

Рассматриваемые технологические процессы поверхностного упрочнения разнообразны, чаще всего используются пневмо и гидродробеструйная обработка [3], дробеструйная обработка и обкатка в сочетании ультразвуком [4; 5], технологии с применением кавитации [6; 7], обкатка роликом, алмазное выглаживание. Указанные технологии эффективно применяются для литых или спеченных из порошка высокопрочных сталей, алюминиевых и титановых сплавов [8; 9].

В работе численно исследуются поля остаточных напряжений и перемещений в некоторых задачах, важных с точки зрения приложений к проектированию перспективных технологий поверхностной обработки ответственных деталей авиационного двигателя и методов разрушающего контроля остаточных напряжений. Использование прямого моделирования технологического процесса, посредством которого создаются эти остаточные напряжения, необходимо для исследования закономерностей их формиро-

вания и выбора рациональных режимов, но для внесения остаточных напряжений в численную модель прогнозирования ресурса изделия выглядит избыточным средством. Для постановки подобных задач вместо расчета предшествующего процесса поверхностной обработки разумно задавать распределение по глубине приповерхностного слоя пластических деформаций, являющихся источником остаточных напряжений в упругом теле. В отличие от поля остаточных напряжений пограничный слой пластических деформаций вблизи свободной границы не изменяется при вырезке полосы из изделия, не должен удовлетворять каким-либо полевым уравнениям и потому представляет удобный способ введения остаточных напряжений в численную модель.

Применительно к пластине, подвергнутой односторонней однородной в ее плоскости обработке, проблема реконструкции распределения пластической деформаций известна. Все известные варианты ее решения сводятся к некорректным задачам. При этом используется решение задачи об остаточных напряжениях при известном распределении пластических деформаций [10–13] либо решению задачи о распределении пластических деформаций в упруго-пластическом полупространстве, вызванном ударом одного шарика цитата [14–19]. Таким образом, приведенные здесь решения задач представляются важным элементом методики учета остаточных напряжений в прогнозных расчетах чувствительных к ним характеристик прочности изделий, подвергнутых поверхностной обработке.

Целью данной работы является

1. Исследование прогиба пластины поверхностно упрочненной в зависимости от ее ширины.
2. Исследование качественного и количественного сравнения распределения остаточных напряжений по глубине в однородно и неоднородно обработанной пластине.
3. Исследование концентрации растягивающих напряжений в поверхностно обработанном затупленном клине.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, двух глав и заключения. Полный объем работы составляет 38 страниц, включая 19 рисунков и 0 таблиц. Список литературы содержит 20 наименований.

Глава 1. Математическая постановка задачи и ее численная формулировка

Рассматривается равновесие свободного от действия внешних сил изотропного линейно-упругого тела с полем пластических деформаций, подчиняющееся уравнениям:

$$\partial_i \sigma_{ij} = 0, \quad (1.1)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}^e, \quad \varepsilon_{ij}^e = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p, \quad \varepsilon_{kk}^p = 0, \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\partial_i u_j + \partial_j u_i), \quad (1.3)$$

где фигурируют компоненты σ_{ij} симметричного тензора напряжений, $\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{ij}^e, \varepsilon_{ij}^p$ - симметричных тензоров полных, упругих и пластических деформаций, u_i - вектора перемещений, ∂_i - частные производные по координатам x, y, z декартовой ортогональной системы, λ, μ - константы Ламе, δ_{ij} - символ Кронекера, индексы i, j, k независимо пробегают значения $1, 2, 3$ и принимается соглашение о суммировании по повторяющимся индексам.

Уравнения (1.1) - (1.3) применяются к пластине с пластическими деформациями, однородно распределенными по ее плоскости и неоднородно распределёнными по ее толщине:

$$\varepsilon_{ij}^p = \begin{pmatrix} \varepsilon^p(z) & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon^p(z) & 0 \\ 0 & 0 & -2\varepsilon^p(z) \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Здесь декартова координата z направлена вдоль нормали к плоскости пластины, а x и y располагаются в этой плоскости вдоль главных осей тензора пластических деформаций. Распределение пластических деформаций (1.4) отражает характер многих технологических процессов упрочняющей обработки плоских поверхностей (дробеструйной, ультразвуковой, лазерной, кавитационной, микропластической и т.д.). Полагается, что такое распределение в свободной пластине вызывает однородное в плоскости пластины распределение напряжений $\sigma_{ij}(z)$ и полных деформаций $\varepsilon_{ij}(z)$. Данная гипотеза будет

выполняться точно для неограниченной в плане пластины, а для тонких пластин с конечным характерным размеров в плане l , много большим толщины h , - всюду за исключением областей, примыкающих к краям. Граничные условия задавались в зависимости от типа решаемой задачи и согласно расчетным схемам изображённым на рисунках (2.5),(3.7),(4.1). Профиль пластических деформаций имеет вид (Рисунок 1.1)

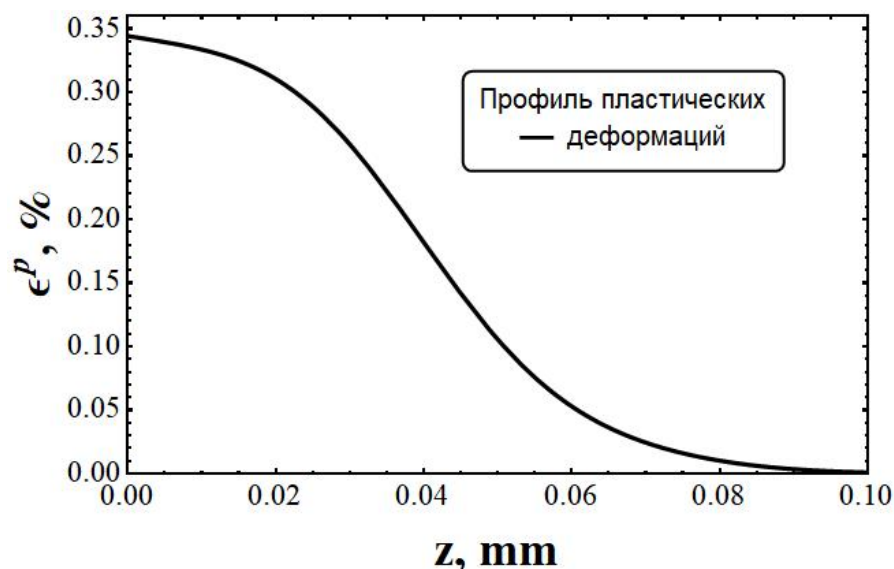


Рисунок 1.1 — Профиль пластических деформаций

Структура тензора пластических деформации (1.4) имеет трансферсальную изотропию в координатах касательной плоскости и нормали обработанной свободной поверхности. Следует заметить, что тензор ε^p (1.4), источник остаточных напряжений, можно трактовать как тензор деформаций пластины с неоднородным анизотропным полем тензора коэффициентов линейного температурного расширения под действием однородного поля температуры:

$$f(z) = k(z)\Delta T, \quad (1.5)$$

где $f(z)$ - источник остаточных напряжений, $k(z)$ - коэффициенты линейного термического расширения, ΔT - однородное поле температур

В расчетах источник остаточных напряжений задавался в термоупругой постановке с однородным полем температуры ΔT и неоднородным анизотропным полем тензора коэффициентов линейного температурного расширения (1.5). Реконструкция пластических деформаций показана в работе [8]. Задавались следующие упругие свойства стали 65Г: $E = 2.15 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.34$.

Для решения задач использовался программный комплекс **ANSYS APDL**, который позволяет задавать анизотропную матрицу, коэффициентов линейного термического расширения. Использовалась формула (1.5). Подставляя в неё известные остаточные напряжения и температуру получали коэффициенты линейного термического расширения. Через команду **mp,alpi** где $i - x, y, z$, задавались полученные коэффициенты линейного термического расширения по нормали к обрабатываемой поверхности.

Глава 2. Исследование стрелы прогиба полосы в зависимости от ее ширины

2.1 Постановка задачи

Основными методами определения остаточных напряжений являются механические и рентгеновские. Весьма перспективны для промышленного применения электрофизические методы, при которых остаточные напряжения определяются по изменению электромагнитных свойств поверхностного слоя. Для оптически активных прозрачных материалов или покрытий можно применять поляризационно-оптические методы фотоупругости и фотопластичности. В работе использовался металлический образец, для которого удобнее всего использовать механический метод. Механические методы определения остаточных напряжений получили наибольшее распространение не только из-за своей простоты, но и вследствие того, что в них используются такие же представления о напряжениях и деформациях механики твердого тела, как и при расчетах деталей на прочность, жесткость и устойчивость. Это облегчает практическое применение результатов исследований для деталей из различных материалов (металлов, керамики, пластмасс и т. д.). Механические методы основаны на предположении, что разрез или удаление части детали с остаточными напряжениями эквивалентны приложению к оставшейся детали, на вновь появившихся поверхностях, напряжений, обратных остаточным. Эти обратные напряжения вызывают деформацию детали или усилия в устройствах, препятствующих деформации. Измеряя возникшие деформации (деформационными методами) или силы реакций (силовыми методами), можно вычислить остаточные напряжения.

Существует инженерная проблема с которой сталкиваются при производстве. Во время работы с различными пластинами возникает вопрос, как правильно подобрать ширину для различных прочностных испытаний и как ширина влияет на прогиб, оказалась что от ширины прогиб не меняется если его мерить по длине в центральном сечении.

Рассмотрим задачу исследование прогиба пластины, поверхностно упрочненной, в зависимости от ее ширины. В данной работе в качестве об-

разца рассматривалась калибровочная пластина из стали 65Г, обработанная с одной стороны. Полевые уравнения (1.1) - (1.4), профиль пластических деформаций (Рисунок 1.1), размеры пластины меняются по ширине, начало координат помещено в центр пластины (Рисунок 2.1) $-l \leq x \leq l$, $-b \leq y \leq b$, $0 \leq z \leq h$, расчетная схема (Рисунок 2.2). Граничные условия запишутся как (2.1). Далее фиолетовым цветом будет обозначался объем с пластической деформацией, а бирюзовым объем без каких либо деформаций.

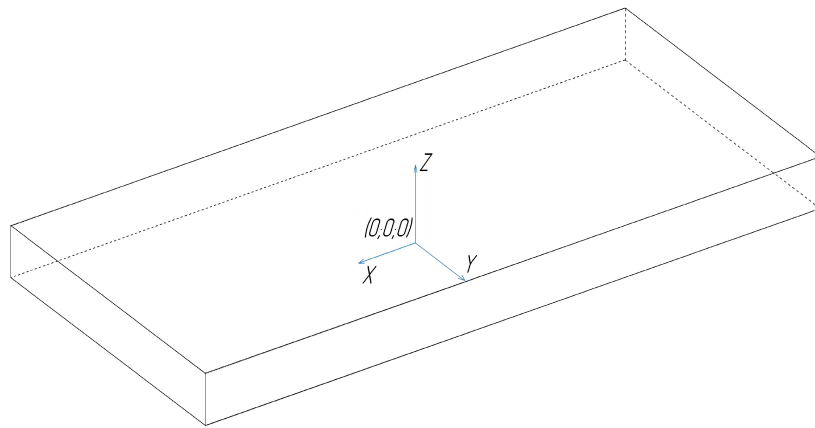


Рисунок 2.1 — Пластина и связанная с ней система координат

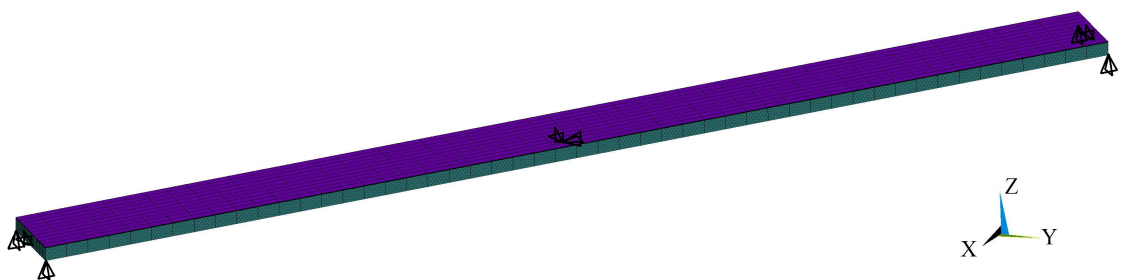


Рисунок 2.2 — Расчетная схема

$$\begin{aligned}
u_x = u_y = 0 & \quad (x = y = z = 0) \\
u_z = 0 & \quad (x = -l; y = -b; z = 0) \\
u_z = 0 & \quad (x = -l; y = b; z = 0) \\
u_z = 0 & \quad (x = l; y = b; z = 0) \\
u_z = 0 & \quad (x = l; y = b; z = 0) \\
u_x = 0 & \quad (x = l; z = y = 0) \\
u_z = 0 & \quad (x = -l; z = y = 0)
\end{aligned} \tag{2.1}$$

2.2 Численное моделирование в программном комплексе ANSYS APDL

Были выполнены расчеты в программе ANSYS APDL для упругой пластинки размерами $100 \times 5h \times 1.3\text{мм}$, $100 \times 10h \times 1.3\text{мм}$, $100 \times 15h \times 1.3\text{мм}$, $100 \times 20h \times 1.3\text{мм}$, $100 \times 25h \times 1.3\text{мм}$, $100 \times 50h \times 1.3\text{мм}$ (размеры l , b и h соответственно) со слоем пластических деформаций(1.4). Пластические деформации вводились в расчет с помощью введения различных коэффициентов линейного термического расширения. Пластины были разбиты на гексагональные структурированные конечные элементы (Рисунок 2.3).

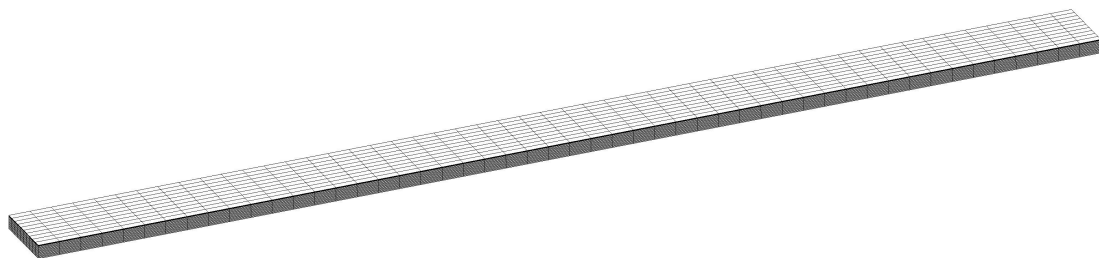


Рисунок 2.3 — Конечно - элементная модель пластинки

2.3 Результаты численного решения

Численный расчет показал, что пластины выгибаются в направлении границы, вблизи которой заданы пластические деформации. Показана одна из пластин (Рисунок 2.4).

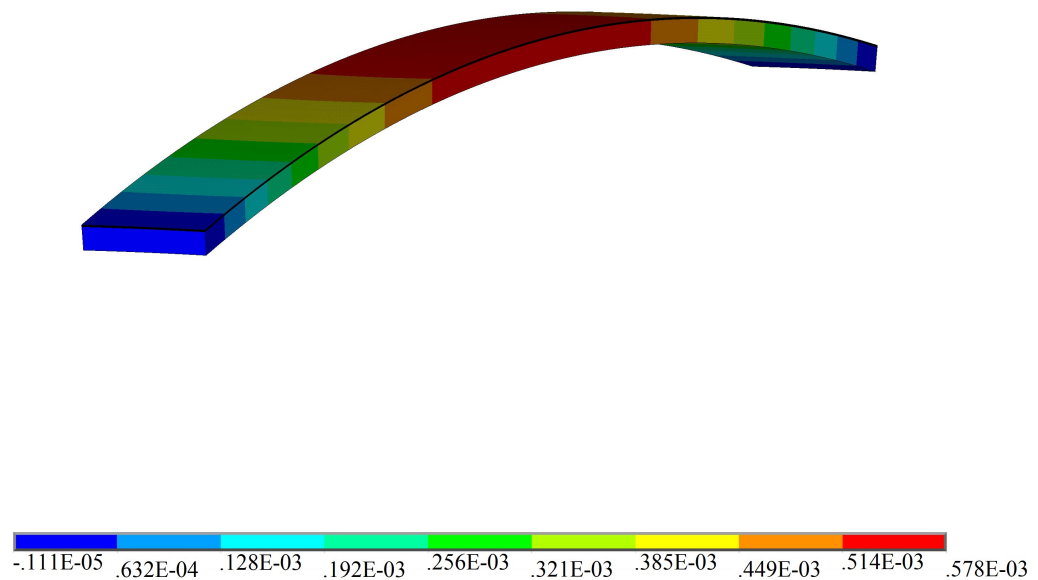


Рисунок 2.4 — Перемещение u_y пластины, вызванное пограничным слоем пластических деформаций

По данным численного эксперимента была построена зависимость перемещения от ширины пластины $u_y|_{z=y=0, -l \leq x \leq l}$ по центральному сечению вдоль длины (Рисунок 2.5).

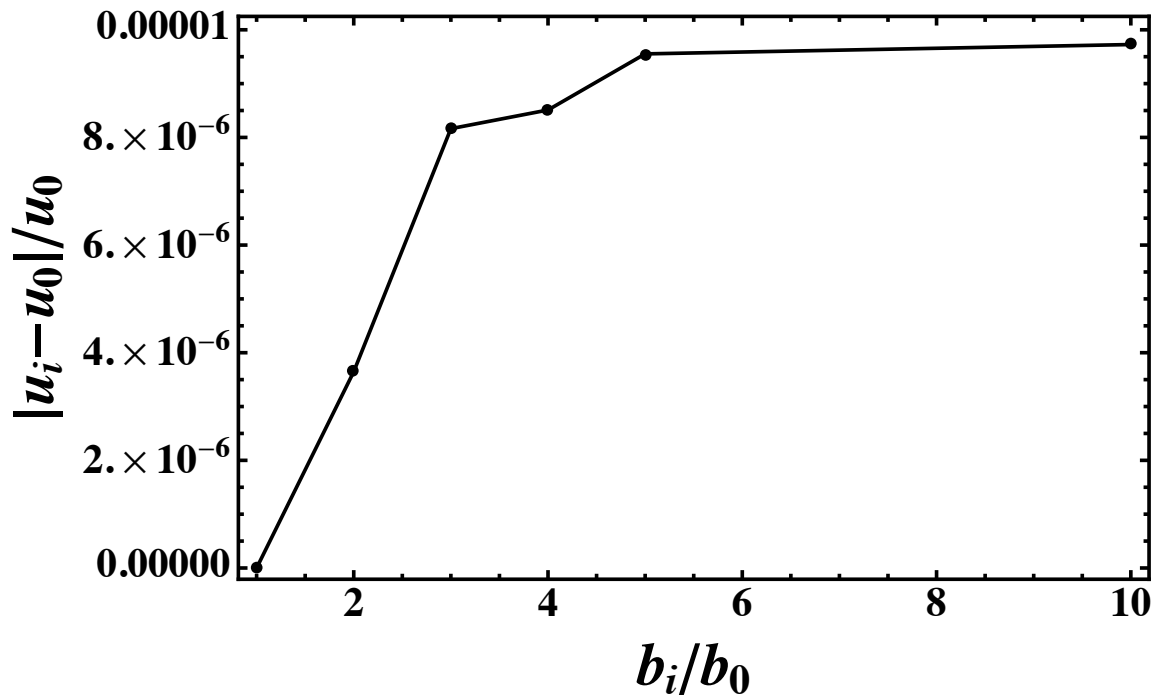


Рисунок 2.5 — Зависимость стрелы прогиба изогнутой полосы от ее ширины

2.4 Вывод по главе 2

Подтверждена независимость стрелы прогиба полосы, подвергнутой односторонней однородной поверхностной обработке пластическим деформированием, от ее ширины. Данный факт важен при лабораторном исследовании остаточных напряжений методом Н.Н.Давиденкова, в особенности нестандартных образцов, разработке нового оборудования для этих задач.

Глава 3. Исследование особенностей распределения остаточных напряжений в пластине с локальной областью поверхности, подвергнутой лазерной проковке

3.1 Постановка задачи

Рассмотрим задачу о локальном наведении остаточных напряжений в образце определенной геометрии, приведенной в работе [20]. Некорректно говорить о глубине профиля остаточных напряжений, если пластина обработана неоднородно, так как поля остаточных напряжений могут уравниваться, если пластина достаточно глубокая или, наоборот, если пластинка обработана однородно глубина может быть достаточно невелика.

Исследуем сравнение распределения остаточных напряжений по глубине пластики с размерами 50x20x4 мм неоднородно обработанной пластической деформацией в центре размерами 15x15 мм и пластинки 50x20x4 мм однородно обработанной пластической деформацией. Полевые уравнения (1.1) - (1.4), профиль пластических деформаций представлен на рисунке (1.1). Расчетная схема приведена на рисунках 3.1,3.2. Начало координат задавалось в центре пластины (Рисунок 2.1), $-l \leq x \leq l$, $-b \leq y \leq b$, $0 \leq z \leq h$. Граничные условия одинаковы для задач и записываются как (3.1)

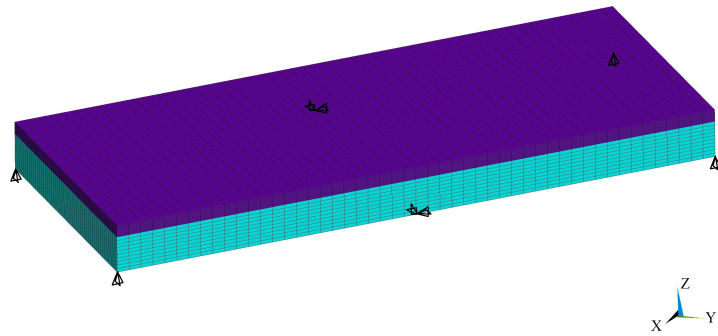


Рисунок 3.1 — Расчетные схемы для однородно обработанной пластины

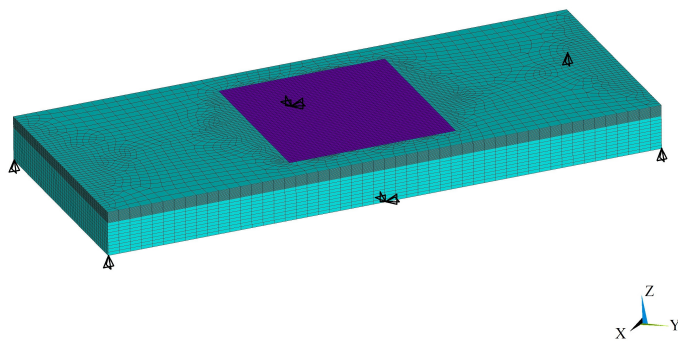


Рисунок 3.2 — Расчетные схемы для неоднородно обработанной пластины

$$\begin{aligned}
 u_x = u_y = 0 & \quad (x = z = 0; y = -b) \\
 u_x = u_y = 0 & \quad (x = z = 0; y = b) \\
 u_z = 0 & \quad (x = -l; y = -b; z = 0) \\
 u_z = 0 & \quad (x = -l; y = b; z = 0) \\
 u_z = 0 & \quad (x = l; y = -b; z = 0) \\
 u_z = 0 & \quad (x = l; y = b; z = 0)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

3.2 Численное моделирование в программном комплексе ANSYS APDL

Пластина однородно обработанная пластической деформацией была разбита на гексогональные структурированные конечные элементы (Рисунок 3.3). Пластина неоднородно обработанная пластической деформацией была разбита на гексогональные конечные элементы, структурированные в месте с неоднородной обработкой и сгущением вблизи этой области (Рисунок 3.4).

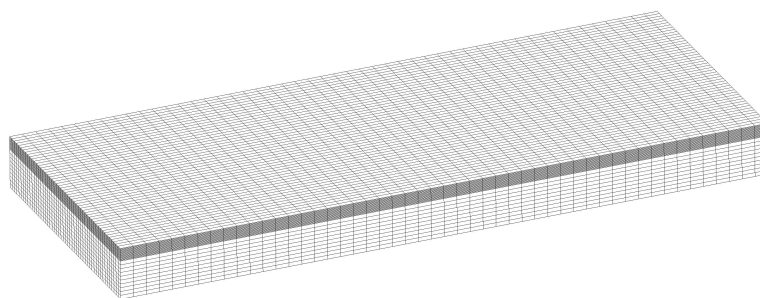


Рисунок 3.3 — Конечно - элементная модель однородно обработанной пластины

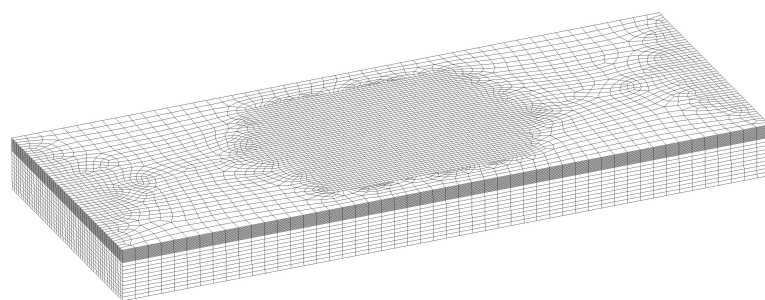


Рисунок 3.4 — Конечно - элементная модель неоднородно обработанной пластины

3.3 Результаты численного решения

Заданный источник пластических деформаций создает поле сжимающего напряжения вблизи обеих наружных поверхностей пластинки, а также поле растягивающего напряжения во внутренней области пластинки. Было получено поле напряжений σ_{xx} . Поле распределения напряжений показано на (Рисунок 3.5),(Рисунок 3.6).

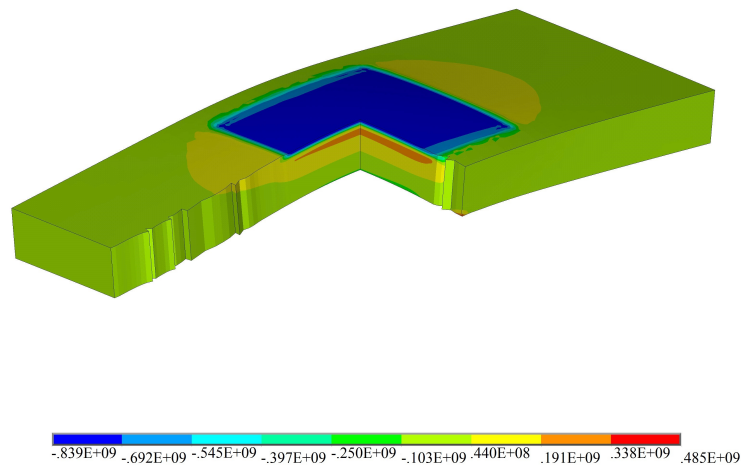


Рисунок 3.5 — Распределение напряжений σ_{xx} неоднородно обработанной пластины

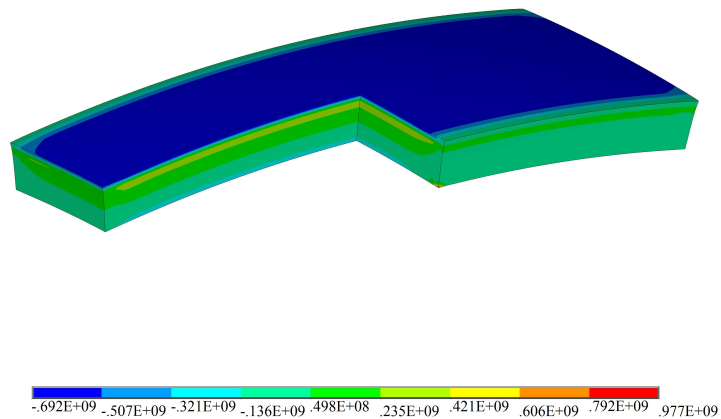


Рисунок 3.6 — Распределение напряжений σ_{xx} однородно обработанной пластины

По данным численного эксперимента была построена эпюра распределения напряжений σ_{xx} (Рисунок 3.7). При этом оказалось $\int \sigma_{xx}(z)dz \approx 0$, что не следует непосредственно из уравнений (1.1) - (1.3).

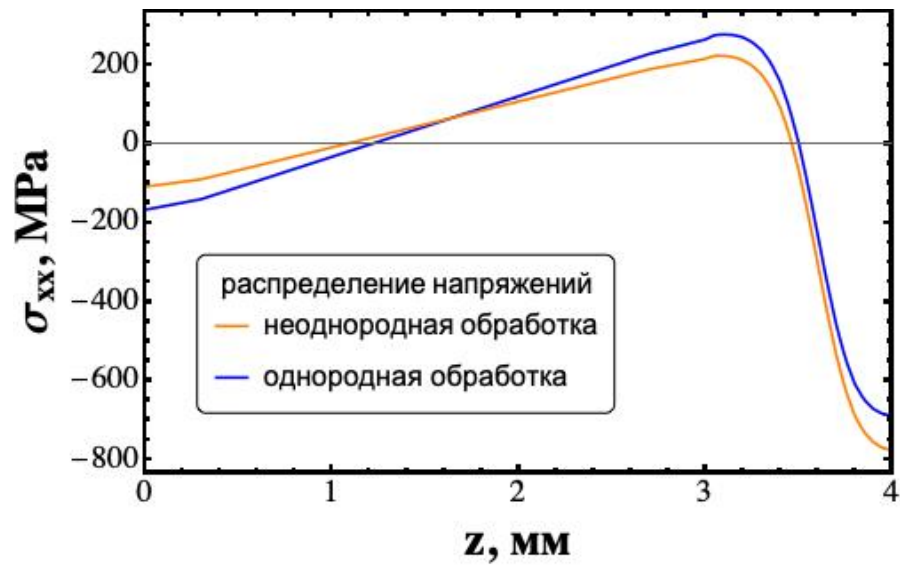


Рисунок 3.7 — Распределение напряжений σ_{xx}

3.4 Вывод по главе 3

Показана возможность оценки глубины и максимальной величины остаточных напряжений с использованием обработки части поверхности контрольной пластины. Ошибка по максимальной величине остаточных напряжений не превышает 8%, при этом для частично обработанной пластины удовлетворяется с хорошим приближением интегральное условие равновесия. Данный результат обосновывает упрощенную методику исследования параметров профиля остаточных напряжений, наведенных различными технологиями обработки.

Глава 4. Исследование особенностей распределения остаточных напряжений вблизи кромки лопатки

4.1 Постановка задачи

Имеются свидетельства технологов, что при обработке лопатки поверхностными пластическими деформациями появляется опасный концентратор растягивающих остаточных напряжений, который ведет к появлению пор, что ведет к образованию трещин изнутри.

Рассмотрим задачу концентрации напряжений в поверхностно обработанном затупленном клине. Начало координат задавалось в центре затупленного клина на нижней грани $-b \leq x \leq b$, $0 \leq y \leq l$. Профиль задавался, в виде, изображенном на рисунке 1.1. Расчетная схема с закреплением затупленного клина приведены на рисунке 4.1. Вводится параметр затупленности клина равный отношению h/l , где h - высота затупленного клина, l - максимальная высота клина. Значения параметра были выбраны следующими : 0.4; 0.5; 0.6 ; 0.7; 0.8; 0.9; 0.91; 0.92; 0.93; 0.94; 0.95; 0.96; 0.97; 0.98; 0.99

Граничные условия запишутся как (4.1)

$$\begin{aligned} u_x = u_y = 0 & \quad (x = y = 0) \\ u_x = 0 & \quad (y = 0) \end{aligned} \quad (4.1)$$

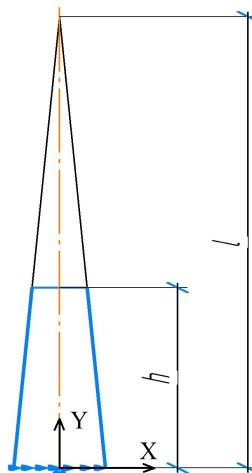


Рисунок 4.1 — Расчетная схема

4.2 Численное моделирование в программном комплексе ANSYS APDL

Затупленный клин был разбит на треугольные конечные элементы сгущающиеся кверху, так как там, предположительно, располагается зона концентратора напряжений (Рисунок 4.2). Распределение по нормали ε^p для боковых границ ε_{yy}^p и сверху ε_{xx}^p (Рисунке 4.3).

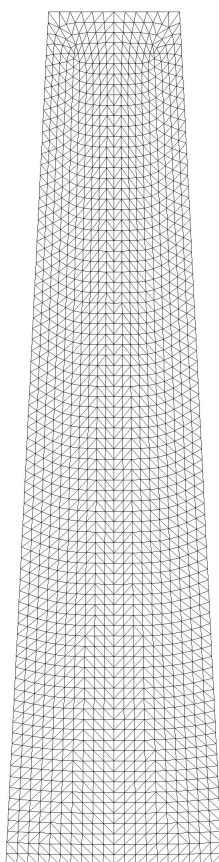


Рисунок 4.2 — Конечно - элементная модель

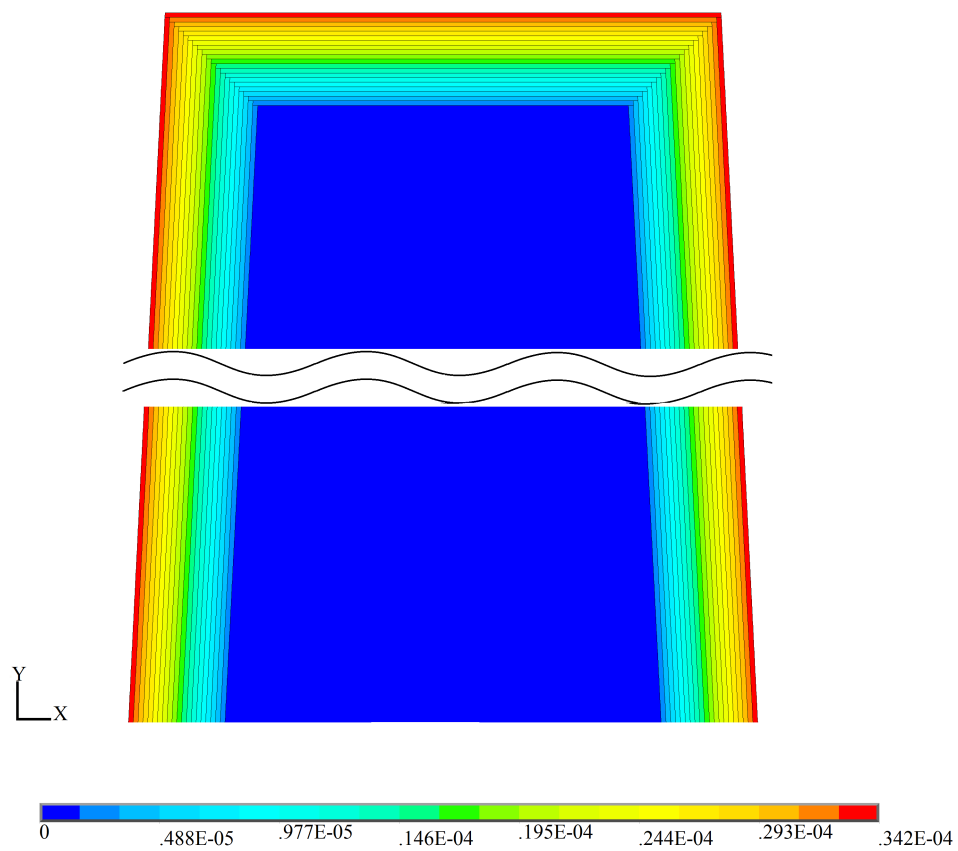


Рисунок 4.3 — Схема затупленного клина с полем пластических деформаций

4.3 Результаты численного решения

Заданный источник пластических деформаций создает поле сжимающего напряжения по контуру, а также поле растягивающего напряжения во внутренней области затупленного клина. Распределение компоненты напряжения σ_{yy} показано на (Рисунке 4.4).

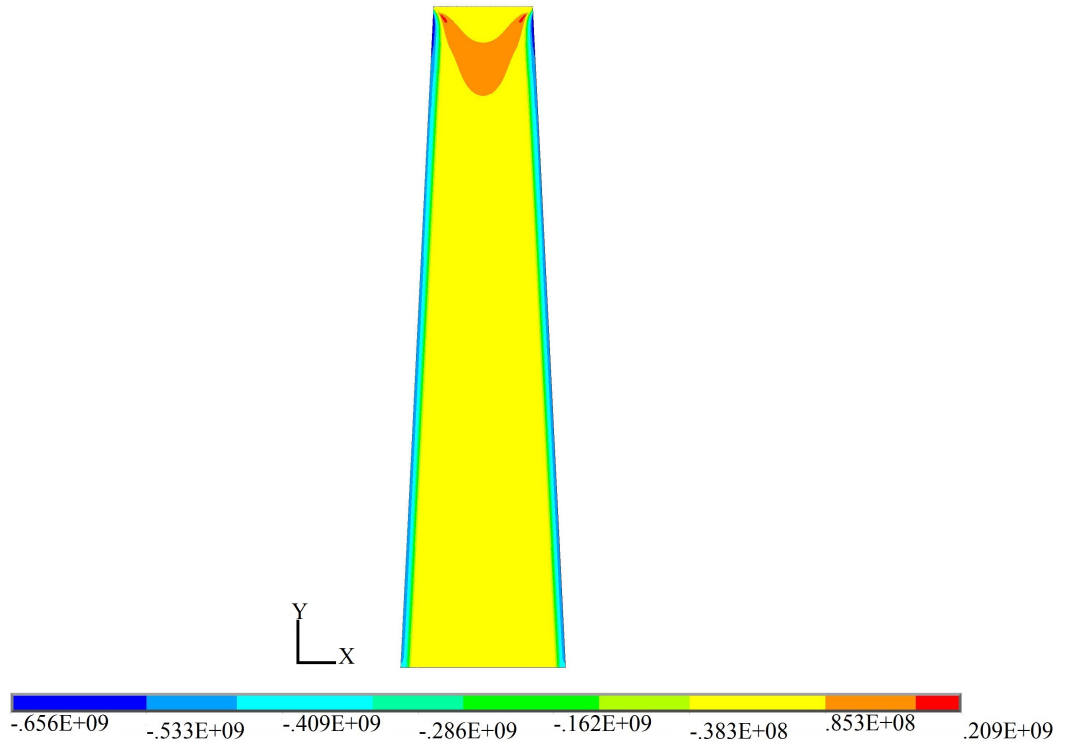


Рисунок 4.4 — Распределение компоненты напряжения σ_{yy}

По данным численного эксперимента было построено распределение максимальных напряжений σ_{yy}^{max} от параметра затупленного клина (Рисунок 4.5).

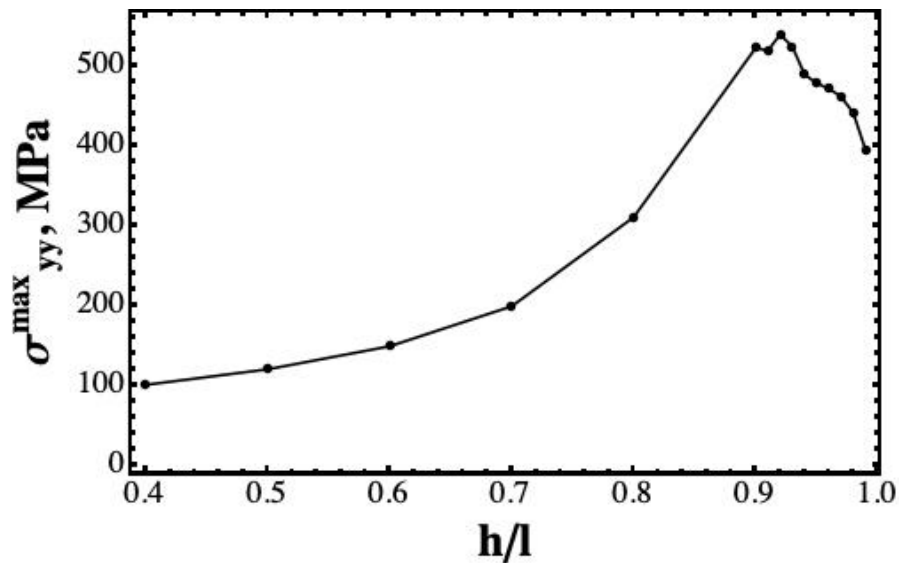


Рисунок 4.5 — Распределение максимальных напряжений от параметра затупленного клина

Так же была проведена сходимость по максимальным напряжениям σ_{yy}^{max} . Путём изменения количества элементов записывались максимальные напряжения до тех пор, пока напряжения не вышли на одно значение (Рисунок 4.6).

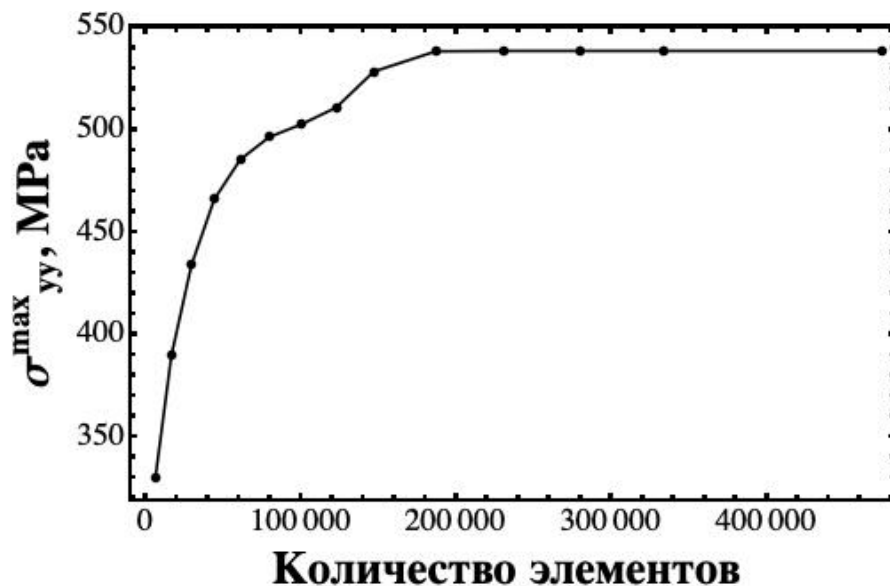


Рисунок 4.6 — Сходимость максимальных напряжений

4.4 Вывод по главе 4

Показано образование опасного концентратора растягивающих напряжений вблизи кромки затупленного клина при его поверхностной обработке пластическими деформациями, способного приводить к пластическому разрушению и образованию усталостных трещин в данной области.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Подтверждена независимость стрелы прогиба полосы, подвергнутой односторонней однородной поверхностной обработке пластическим деформированием, от ее ширины. Данный факт важен при лабораторном исследовании остаточных напряжений методом Н.Н.Давиденкова, в особенности нестандартных образцов, разработке нового оборудования для этих задач.
2. Показана возможность оценки глубины и максимальной величины остаточных напряжений с использованием обработки части поверхности контрольной пластины. Ошибка по максимальной величине остаточных напряжений не превышает 8%, при этом для частично обработанной пластины удовлетворяется с хорошим приближением интегральное условие равновесия. Данный результат обосновывает упрощенную методику исследования параметров профиля остаточных напряжений, наведенных различными технологиями обработки.
3. Показано образование опасного концентратора растягивающих напряжений вблизи кромки затупленного клина при его поверхностной обработке пластическими деформациями, способного приводить к пластическому разрыхлению и образованию усталостных трещин в данной области.

Список литературы

1. *Биргер, И. А.* Остаточные напряжения / И. А. Биргер. — М. : Машгиз, 1963. — 232 с.
2. *Kopp, R.* Flexible sheet forming technology by double-sided simultaneous shot peen forming / R. Kopp, J. Schulz // CIRP Annals. — 2002. — Vol. 51, no. 1. — P. 195–198.
3. *Dounde, A. A.* Study of shot peening process and their effect on surface properties: A Review / A. A. Dounde, C. Y. Seemikeri, P. R. Tanpure // International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications (IJEBEA). — 2015. — Vol. 2, no. 12. — P. 104–107.
4. Simulation of shot dynamics for ultrasonic shot peening: Effects of process parameters / J. Badreddine [et al.] // International Journal of Mechanical Sciences. — 2014. — Vol. 82. — P. 179–190.
5. *Yu, L.* Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process / L. Yu, L. Wang, D. Wang // Journal of Materials Processing Technology. — 2011. — Vol. 211, no. 12. — P. 2106–2113.
6. *Кузнецов, Н. Д.* Технологические методы повышения надежности деталей машин: справочник / Н. Д. Кузнецов, В. И. Цейтлин, В. И. Волков. — М. : Машиностроение, 1993. — 304 с.
7. *Han, B.* Compressive residual stress induced by water cavitation peening: A finite element analysis / B. Han, D. Y. Ju // Materials and Design. — 2009. — Vol. 30, no. 8. — P. 3325–3332.
8. Келлер И. Э., Трофимов В. Н., Владыкин А. В., Плюснин В. В., Петухов Д. С., Виндокуров И. В., К вопросу о реконструкции остаточных напряжений и деформаций пластины после дробеструйной обработки // Вестник самарского государственного технического университета. серия: физико-математические науки. — 2018. — Т. 22, № 1. — С. 40–64.
9. *Champaigne, J.* Shot Peening Overview [Электронный ресурс] / J. Champaigne. — 2001. — URL: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2001012.pdf> (дата обр. 19.04.2019).

10. *Korsunsky, A. M.* On the modelling of residual stresses due to surface peening using eigenstrain distributions / A. M. Korsunsky // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. — 2005. — Vol. 40, no. 8. — P. 817–824.
11. *Korsunsky, A. M.* Residual elastic strain due to laser shock peening: Modelling by eigenstrain distribution / A. M. Korsunsky // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. — 2006. — Vol. 41, no. 3. — P. 195–204.
12. Numerical and experimental investigation on shot-peening induced deformation. Application to sheet metal forming / F. Cochenec [et al.] // JCPDS-International Centre for Diffraction. — 2009. — P. 511–518.
13. *Musinski, W. D.* On the eigenstrain application of shot-peened residual stresses within a crystal plasticity framework: Application to Ni-base superalloy specimens / W. D. Musinski, D. L. McDowell // International Journal of Mechanical Sciences. — 2015. — Vol. 100. — P. 195–208.
14. Mechanical approach to the residual stress field induced by shot peening / J. K. Li [et al.] // Materials Science and Engineering. — 1991. — Vol. A147. — P. 167–173.
15. *Shen, S.* An analytical model for shot-peening induced residual stresses / S. Shen, S. N. Atluri // Computers, Materials and Continua. — 2006. — Vol. 4, no. 2. — P. 75–85.
16. Analytical modelling for residual stresses produced by shot peening / A. S. Franchim [et al.] // Materials and Design. — 2009. — Vol. 30. — P. 1556–1560.
17. *Davis, J.* A study of the residual stress induced by shot peening for an isotropic material based on Prager's yield criterion for combined stresses / J. Davis, M. A. Ramulu // Meccanica. — 2015. — Vol. 50. — P. 1593–1604.
18. Experimental measurement and analytical determination of shot peening residual stresses considering friction and real unloading behavior / K. Sherafatnia [et al.] // Materials Science and Engineering. — 2016. — Vol. A657. — P. 309–321.
19. Simulation of shot peening: From process parameters to residual stress Fields in a structure / D. Gallitelli [et al.] // International Journal of Mechanical Sciences. — 2016. — Vol. 344, no. 4/5. — P. 355–374.

20. Experimental and numerical investigation of residual stresses in laser shock peened AA2198 / S. Keller [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. — 2018. — Vol. 255. — P. 294–307.

Список рисунков

1.1	Профиль пластических деформаций	12
2.1	Пластина и связанная с ней система координат	15
2.2	Расчетная схема	15
2.3	Конечно - элементная модель пластинки	17
2.4	Перемещение u_y пластины, вызванное пограничным слоем пластических деформаций	18
2.5	Зависимость стрелы прогиба изогнутой полосы от ее ширины . . .	19
3.1	Расчетные схемы для однородно обработанной пластины	22
3.2	Расчетные схемы для неоднородно обработанной пластины	22
3.3	Конечно - элементная модель однородно обработанной пластины .	23
3.4	Конечно - элементная модель неоднородно обработанной пластины	24
3.5	Распределение напряжений σ_{xx} неоднородно обработанной пластины	25
3.6	Распределение напряжений σ_{xx} однородно обработанной пластины	25
3.7	Распределение напряжений σ_{xx}	26
4.1	Расчетная схема	28
4.2	Конечно - элементная модель	29
4.3	Схема затупленного клина с полем пластических деформаций . . .	30
4.4	Распределение компоненты напряжения σ_{yy}	31
4.5	Распределение максимальных напряжений от параметра затупленного клина	32
4.6	Сходимость максимальных напряжений	32