

Исследование характеристик локального НДС и контактного взаимодействия при растяжении титановой полосы с прижатыми к ней шайбами

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Экспериментально установлено [1-3], что при циклическом растяжении гладких образцов полосы из сплава ВТ6 с прижатой к ней шайбой, выполненной из различного материала, усталостное разрушение образцов в условиях фреттинг-коррозии происходит по наружной границе зоны контакта шайбы с полосой (см. рис. 1, 2). Результаты проведенных исследований, позволили изучить механизм фреттинг-коррозии, а также получить кривые усталости образца из сплава ВТ6 в условиях фреттинг-коррозии. Однако экспериментальные исследования не дают информации об изменении параметров, характеризующих локальное НДС в полосе, а также не позволяют проанализировать влияние материала шайб и величины контактного давления на распределение контактных давлений и микросмещений в зоне контакта полосы с шайбой. Существующие аналитические решения задачи о контакте шайбы с полосой характеризуются достаточной трудоемкостью и имеют ряд упрощений, вызванных сложностью получения решения дифференциальных уравнений для конкретной геометрии контактируемых тел.

Метод конечных элементов и его практическая реализация в виде отдельных прикладных коммерческих программ является наиболее распространенным в настоящее время методом исследования параметров НДС тел произвольной геометрии, находящихся в сложных условиях нагружения. Объясняется это единством подхода в описании моделируемого процесса, т.е. удобством формализации решаемой задачи, с одной стороны, и простотой реализации алгоритма на персональных компьютерах, с другой стороны. Решение поставленной задачи получено с помощью системы ANSYS.

Целью данной работы является исследование влияния величины контактных давлений, материала шайб и уровня нагружения на характеристики локального НДС гладкой полосы в зоне вероятного усталостного разрушения. Основанием для проведения численных исследований послужили результаты экспериментальных исследований по определению долговечности образцов из титанового сплава и изучению механизма действия фреттинг-коррозии в целях верификации полученных результатов и дополнения их в области расчета параметров, характеризующих локальное НДС.

Объектом исследования является гладкая полоса, изготовленная из материала ВТ6, геометрические размеры которой показаны на рис. 3. Полоса нагружена равномерными растягивающими напряжениями, величина которых варьировалась в ходе анализа в диапазоне: $\sigma_{\text{дд}}^0 = 150, 200, 250, 300, 350, 400$ и 450 МПа. К полосе с обеих сторон прижаты шайбы. Величина контактных давлений, определяющих усилие прижима шайб, принята равномерной по всей поверхности шайб и изменялась в ходе анализа в диапазоне: $\sigma_{\text{к}} = 50, 75, 100$ и

150 МПа. В работе рассмотрены следующие материалы шайб: титан ВТ3-1, сталь 30ХГСА и алюминиевый сплав Д16АТ.



Рисунок 1 – Характер усталостного разрушения гладкой полосы из сплава ВТ6 в условиях фреттинг-коррозии при действии контактных давлений различной величины

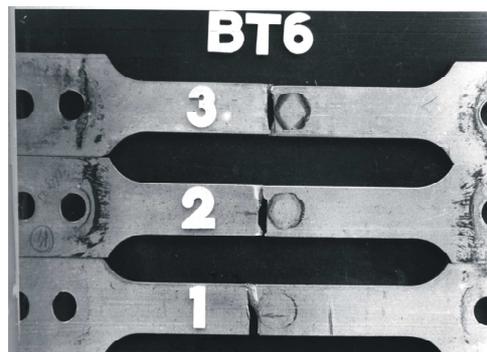


Рисунок 2 – Характер усталостного разрушения гладкой полосы из сплава ВТ6 при различном сочетании материалов в контактной паре: 1 – шайба из ВТ3 – 1; 2 – кадмированная шайба из 30ХГСА; 3 – оксидированная шайба из Д16АТ

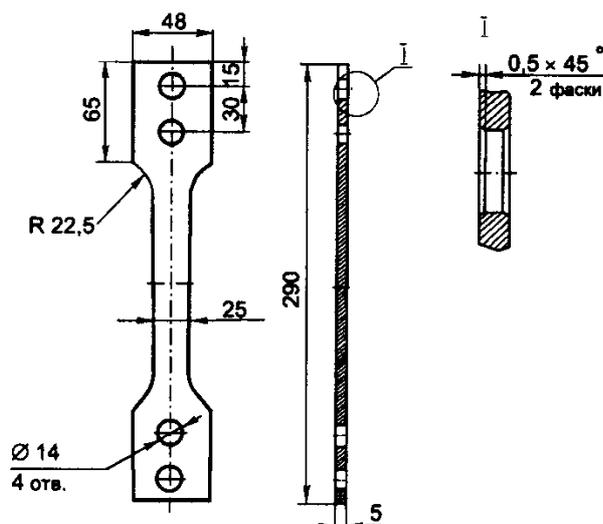


Рисунок 3 – Образец гладкой полосы

Учитывая геометрическую симметрию образца и симметричный характер его нагружения, рассматриваем 1/8 часть модели с заданием соответствующих условий симметрии (см. рис. 4). Захватную часть образца не моделировали.

Поскольку максимальный уровень действующих напряжений в полосе не превышает предел текучести, то для описания поведения материала полосы и шайб принята линейная модель упругости.

Ниже приведены физико-механические характеристики материалов полосы и шайб, используемых в расчетах.

Полоса – титан ВТ6. Модуль упругости $E=120000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; коэффициент трения $\mu = 0,29$ [4].

Шайбы – титан ВТ3-1. Характеристики в упругой зоне такие же как и у сплава ВТ6;

сталь 30ХГСА. Модуль упругости $E=210000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; коэффициент трения $\mu = 0,21$ [5].

Д16АТ. Модуль упругости $E=72000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; коэффициент трения $\mu = 0,18$ [6].

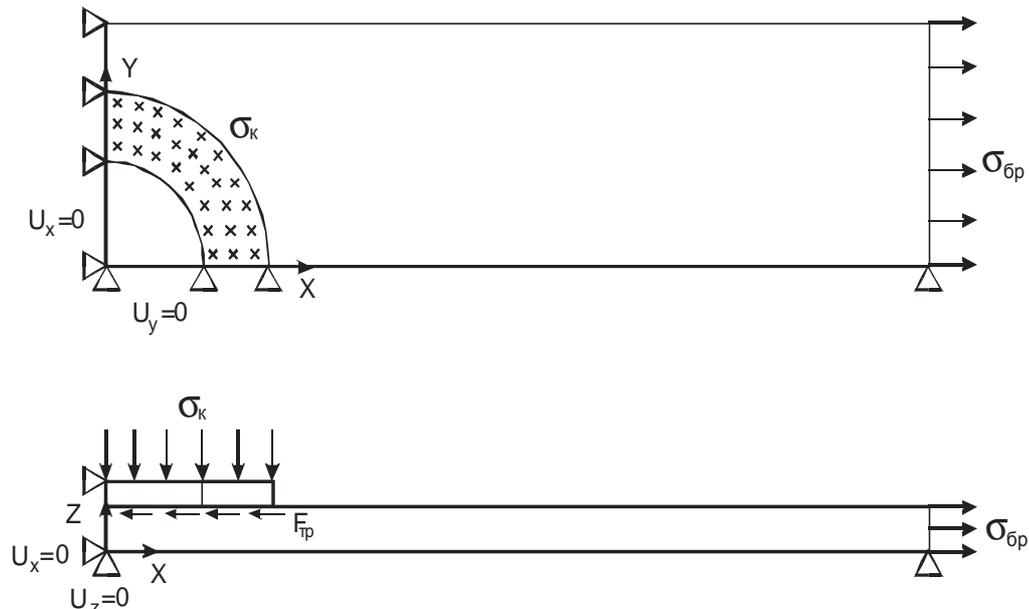


Рисунок 4 – Расчетная схема гладкого образца с прижатой к нему шайбой

На рис. 5 показана конечно-элементная модель гладкого образца с прижатой шайбой.

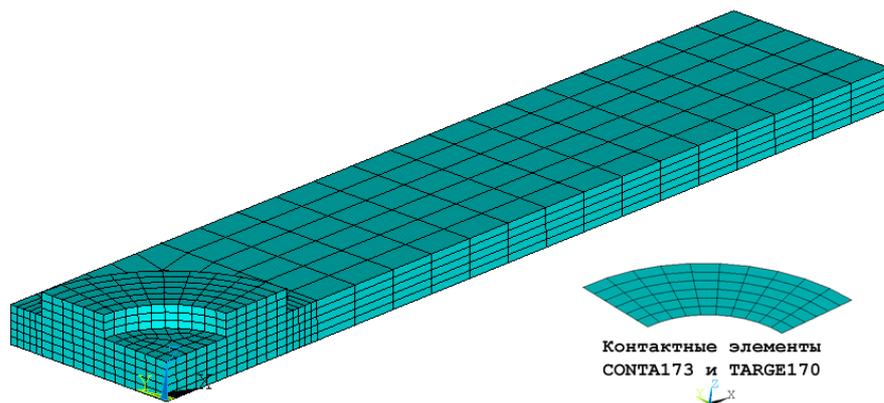


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель 1/8 гладкого образца с прижатой к нему шайбой

Проанализирован характер распределения параметров, характеризующих локальное НДС в гладком образце. В качестве исследуемых параметров, характеризующих изменение локального НДС в гладкой полосе в условиях фреттинг-коррозии, выбраны величины главных растягивающих напряжения σ_1 и

деформаций ε_1 , а также их произведение w_1 . Кроме того, рассмотрены величины контактных давлений и микросмещений.

Определен характер распределения указанных параметров в гладкой полосе в зоне контакта под шайбой и на границе контакта полоса-шайба.

Определена точка, в которой величины главных растягивающих напряжения σ_1 и деформаций ε_1 , а также их произведение достигают максимума. Данная точка находится в зоне, расположенной на границе контакта полоса-шайба и смещена от наружного края шайбы на 0,25...1 мм в зависимости от материала шайбы.

На рис. 6–11 показан характер распределения главных растягивающих напряжений σ_1 в гладкой полосе для разных значений контактных давлений и растягивающих напряжений в сечении брутто. Буквами обозначено:

а – $\sigma_{ad}^0 = 0$ МПа, б – $\sigma_{ad}^0 = 450$ МПа

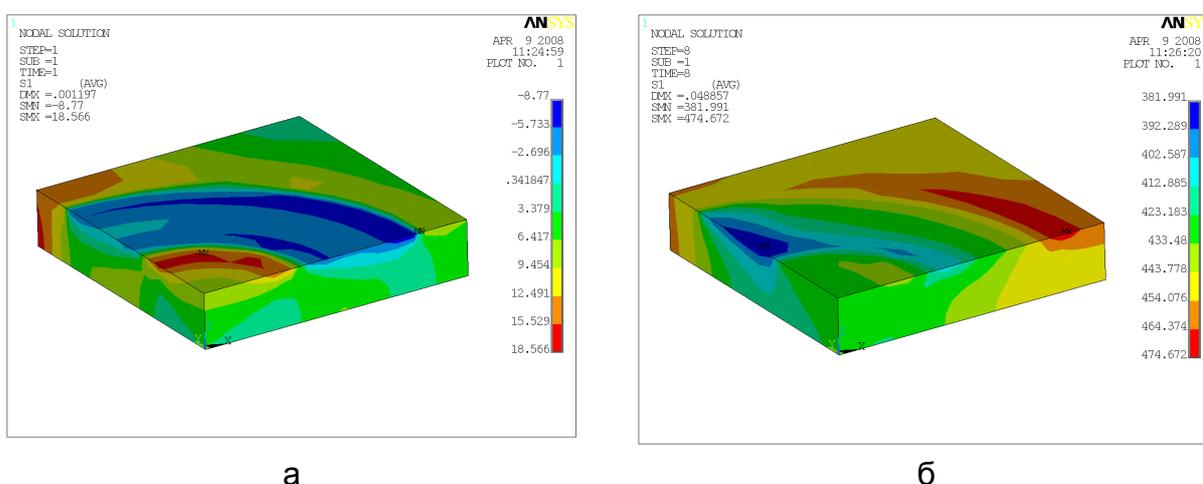


Рисунок 6 – Характер распределения главных растягивающих напряжений σ_1 в гладкой полосе в зоне контакта ($\sigma_k=50$ МПа) полоса-шайба (шайба изготовлена из титанового сплава ВТ3-1)

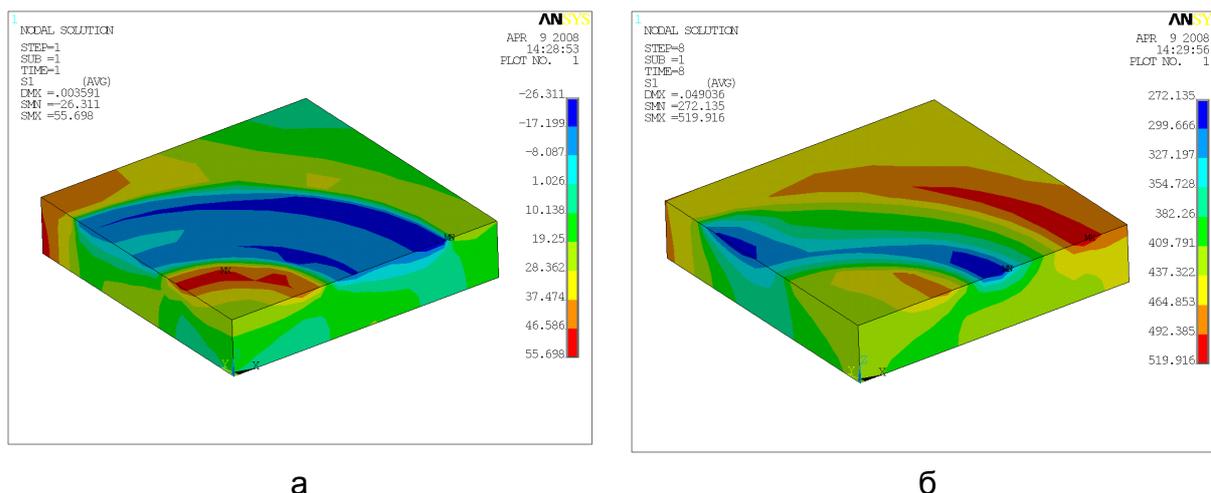
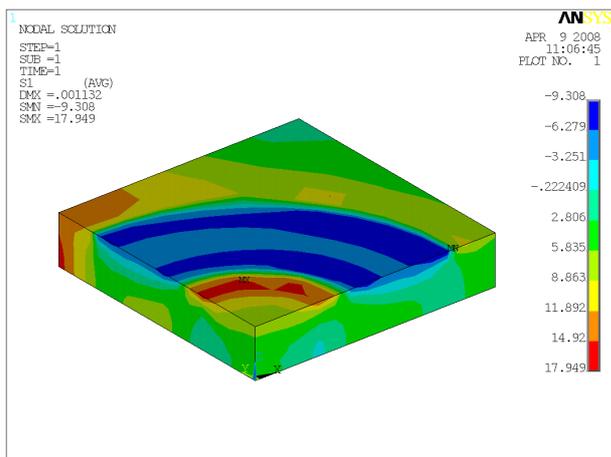
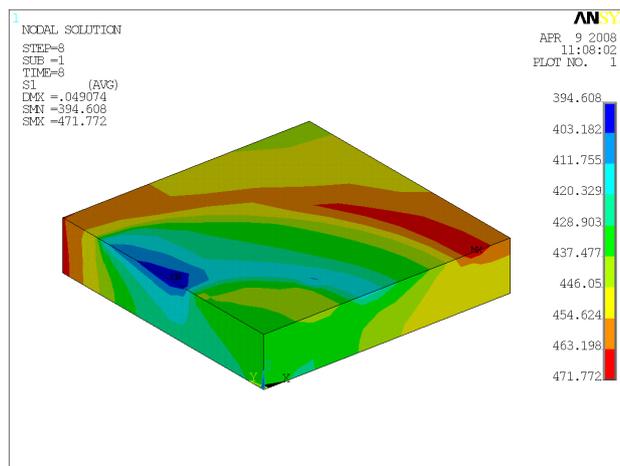


Рисунок 7 – Характер распределения главных растягивающих напряжений σ_1 в гладкой полосе в зоне контакта ($\sigma_k=150$ МПа) полоса-шайба (шайба изготовлена из титанового сплава ВТ3-1)

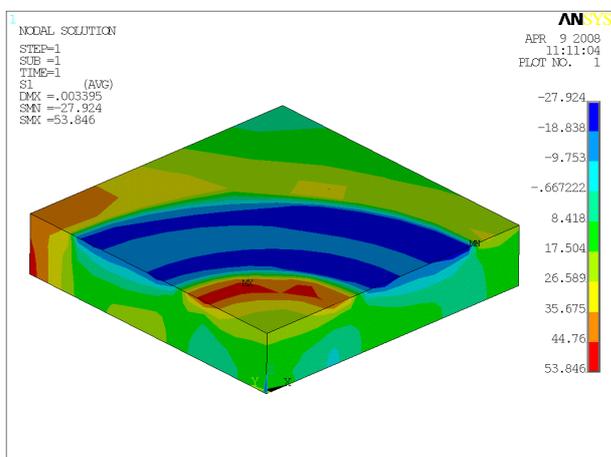


а

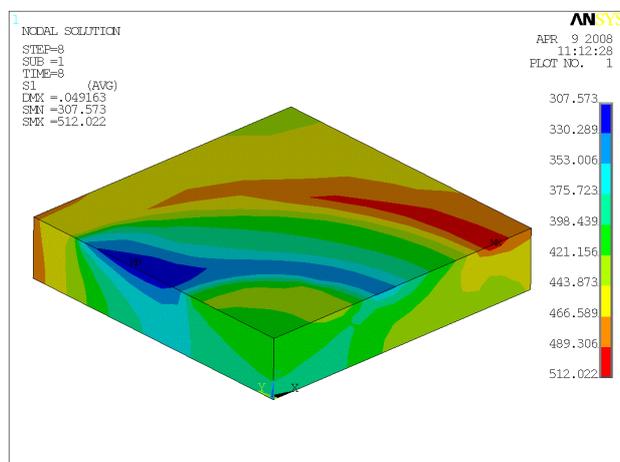


б

Рисунок 8 – Характер распределения главных растягивающих напряжений σ_1 в гладкой полосе в зоне контакта ($\sigma_k=50$ МПа) полоса-шайба (шайба изготовлена из стали 30ХГСА)

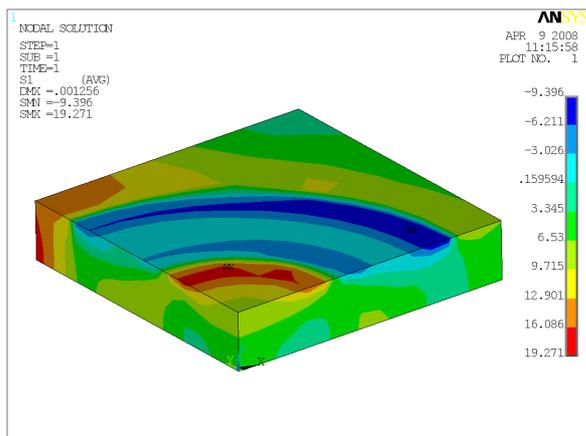


а

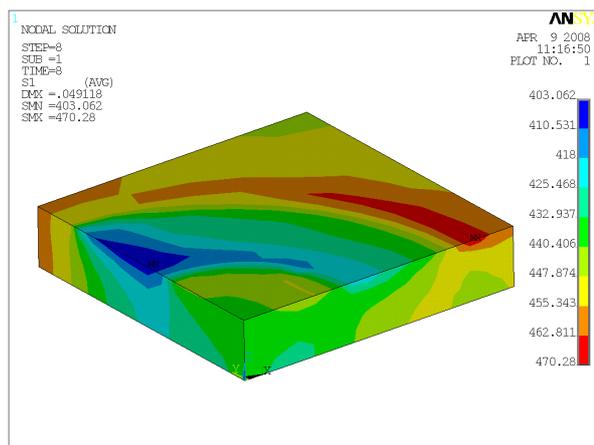


б

Рисунок 9 – Характер распределения главных растягивающих напряжений σ_1 в гладкой полосе в зоне контакта ($\sigma_k=150$ МПа) полоса-шайба (шайба изготовлена из стали 30ХГСА)

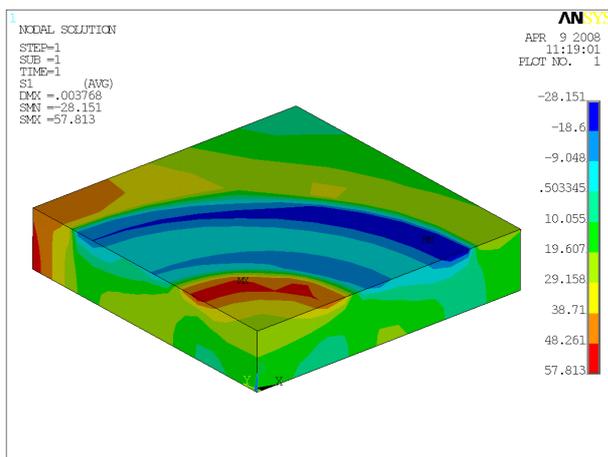


а

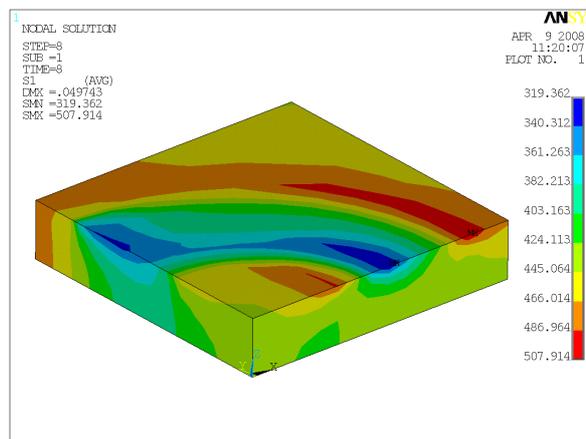


б

Рисунок 10 – Характер распределения главных растягивающих напряжений σ_1 в гладкой полосе в зоне контакта ($\sigma_k=50$ МПа) полоса-шайба (шайба изготовлена из алюминиевого сплава Д16АТ)



а



б

Рисунок 11 – Характер распределения главных растягивающих напряжений σ_1 в гладкой полосе в зоне контакта ($\sigma_k=150$ МПа) полоса-шайба (шайба изготовлена из алюминиевого сплава Д16АТ)

В результате анализа характера распределения главных растягивающих напряжений σ_1 определена зона их максимального значения, расположенная на границе контакта полоса-шайба и смещенная от наружного края шайбы на 0,25...1 мм в зависимости от материала шайбы.

Исследовано влияние уровня нагружения, величины контактных давлений и материала шайб на изменение максимальных главных напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в гладкой полосе.

На рис. 12 –20 показано влияние уровня нагружения, величины контактных давлений и материала шайб на изменение максимальных главных напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в гладкой полосе. Цифрами обозначены: 1 – $\sigma_k = 0$ МПа; 2 – $\sigma_k = 50$ МПа; 3 – $\sigma_k = 75$ МПа; 4 – $\sigma_k = 100$ МПа и 5 – $\sigma_k = 150$ МПа.

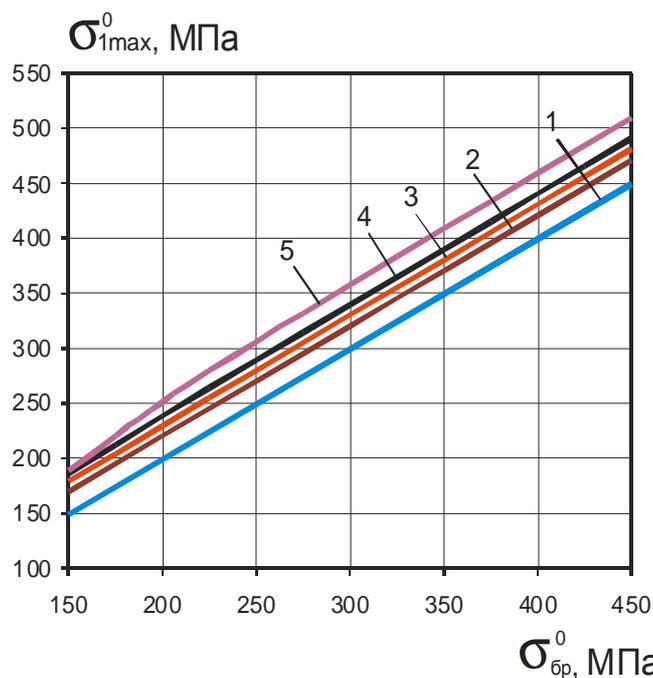


Рисунок 12 – Влияние уровня нагружения, величины контактных давлений и материала шайб на изменение максимальных главных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в гладкой полосе (шайба изготовлена из сплава ВТ3-1)

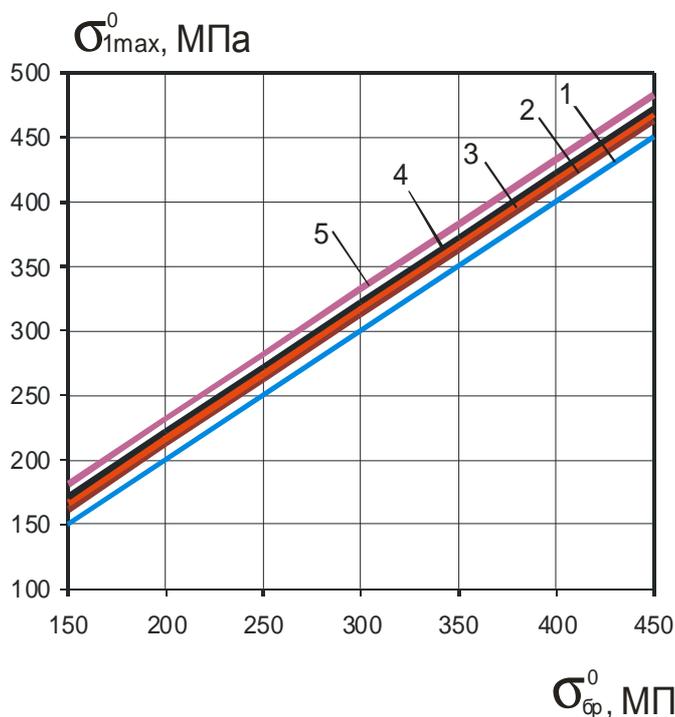


Рисунок 13 – Влияние уровня нагружения, величины контактных давлений и материала шайб на изменение максимальных главных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в гладкой полосе (шайба изготовлена из стали 30ХГСА)

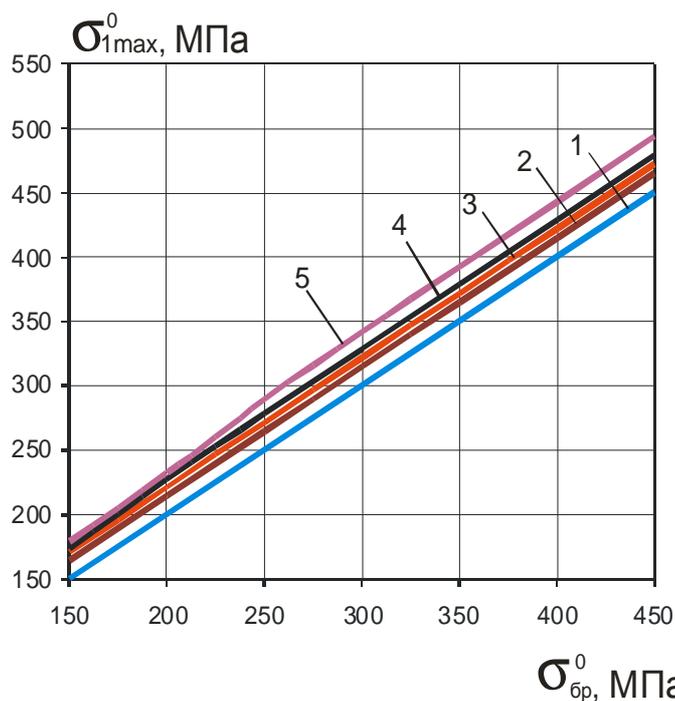


Рисунок 14 – Влияние уровня нагружения, величины контактных давлений и материала шайб на изменение максимальных главных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в гладкой полосе (шайба изготовлена из Д16АТ)

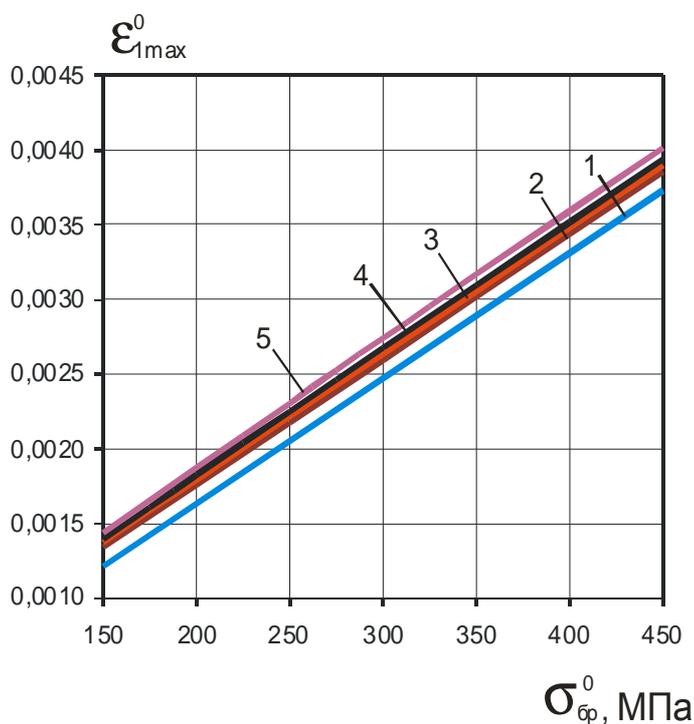


Рисунок 15 – Влияние уровня нагружения, величины контактных давлений и материала шайб на изменение максимальных главных деформаций эквивалентного отнулевого цикла в гладкой полосе (шайба изготовлена из сплава ВТЗ-1)

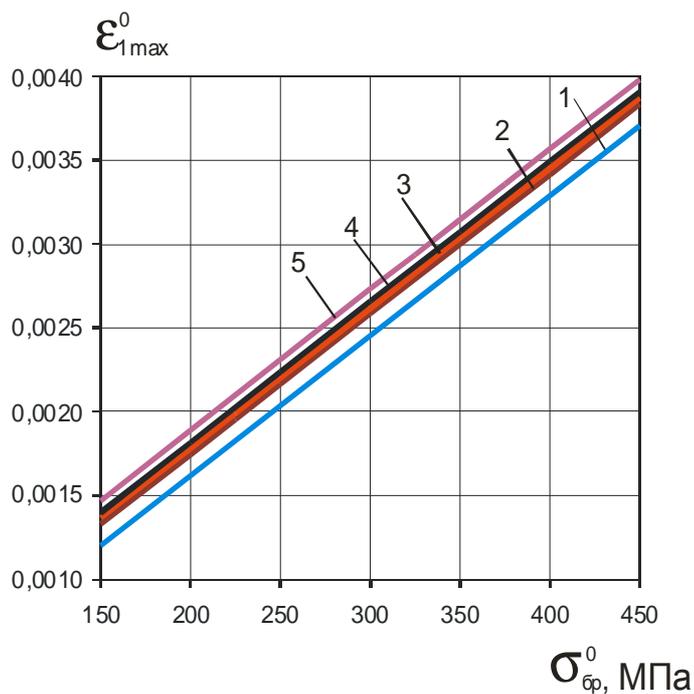


Рисунок 16 – Влияние уровня нагружения, величины контактных давлений и материала шайб на изменение максимальных главных деформаций эквивалентного отнулевого цикла в гладкой полосе (шайба изготовлена из стали 30ХГСА)

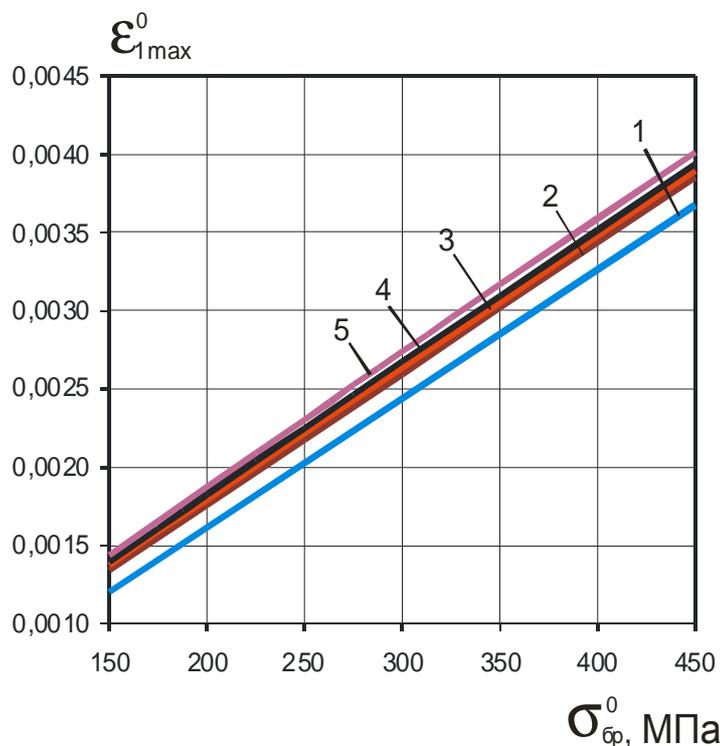


Рисунок 17 – Влияние уровня нагружения, величины контактных давлений и материала шайб на изменение максимальных главных деформаций эквивалентного отнулевого цикла в гладкой полосе (шайба изготовлена из Д16АТ)

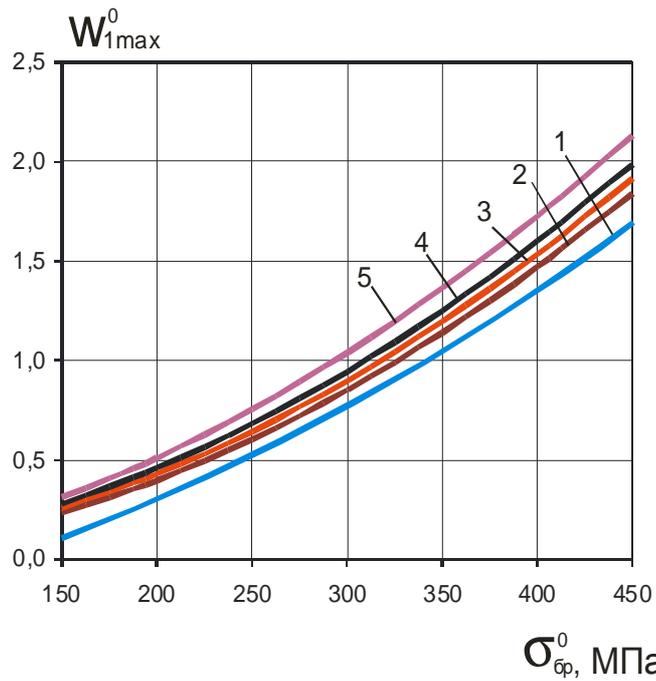


Рисунок 18 – Влияние уровня нагружения, величины контактных давлений и материала шайб на изменение максимальной главной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в гладкой полосе (шайба изготовлена из сплава ВТЗ-1)

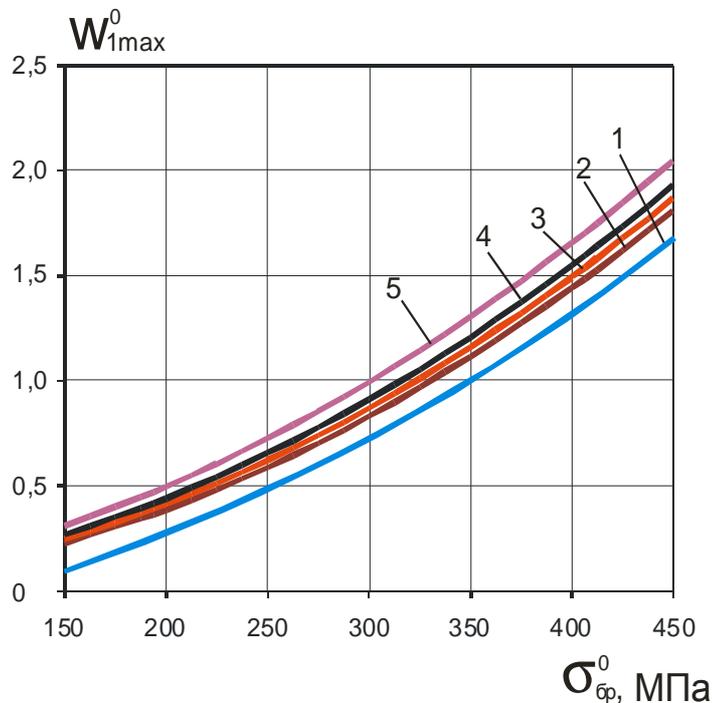


Рисунок 19 – Влияние уровня нагружения, величины контактных давлений и материала шайб на изменение максимальной главной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в гладкой полосе (шайба изготовлена из стали 30ХГСА)

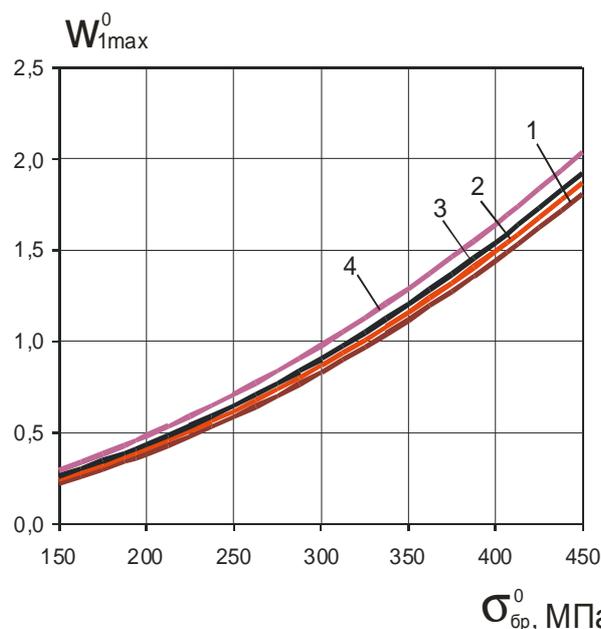


Рисунок 20 – Влияние уровня нагружения, величины контактных давлений и материала шайб на изменение максимальной главной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в гладкой полосе (шайба изготовлена из Д16АТ)

Повышение величины контактных давлений с 50 до 150 МПа приводит к росту максимальных главных растягивающих напряжений – в 1,04–1,12 раза, деформаций – в 1,04–1,1 раза и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла – в 1,15–1,35 раза.

Исследован характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине в различных сечениях полосы для случая изготовления шайб из стали 30ХГСА (рис. 21 – 25).

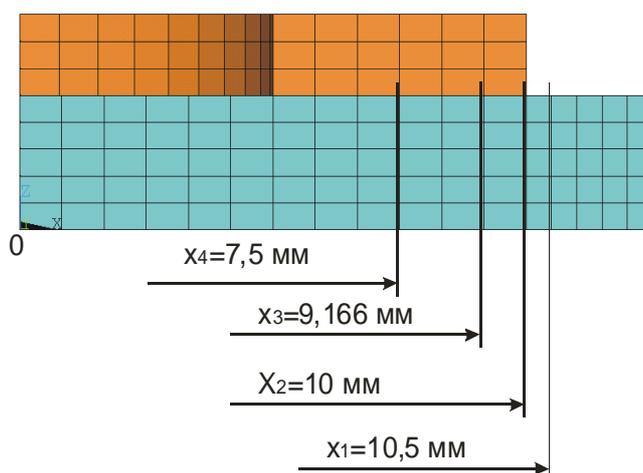
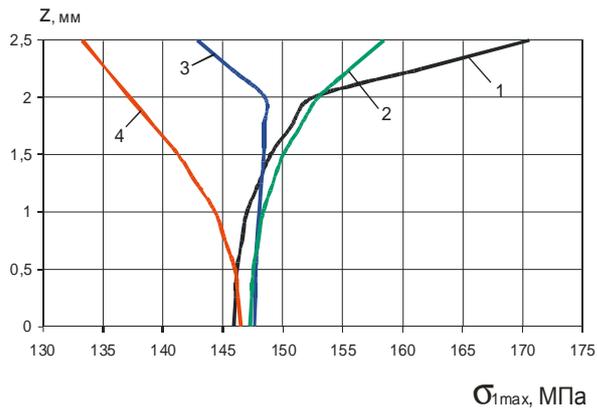
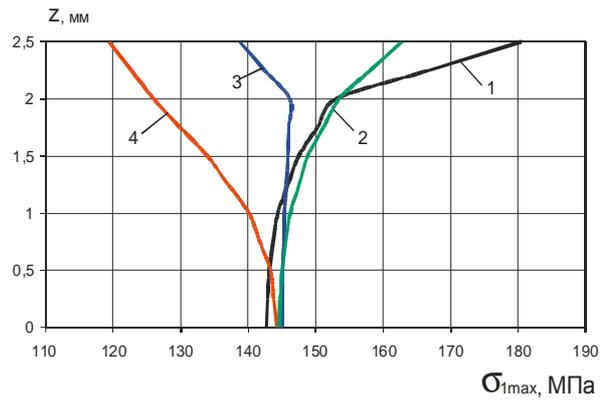


Рисунок 21 – Схема индикации сечений, в которых строились распределения главных растягивающих напряжений по толщине

На рис. 22 – 25 приняты следующие обозначения:
 а – $\sigma_k = 50$ МПа, б – $\sigma_k = 75$ МПа, $\sigma_k = 100$ МПа, $\sigma_k = 150$ МПа;
 1 – сечение 1 ($x_1 = 10,5$ мм); 2 – сечение 2 ($x_2 = 10$ мм); сечение 3 ($x_3 = 9,166$ мм);
 сечение 4 ($x_4 = 7,5$ мм).

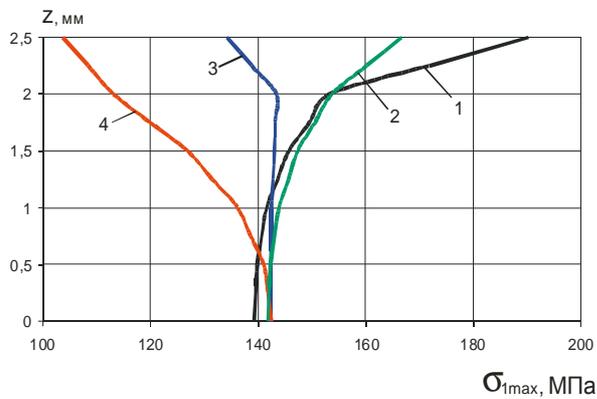


а

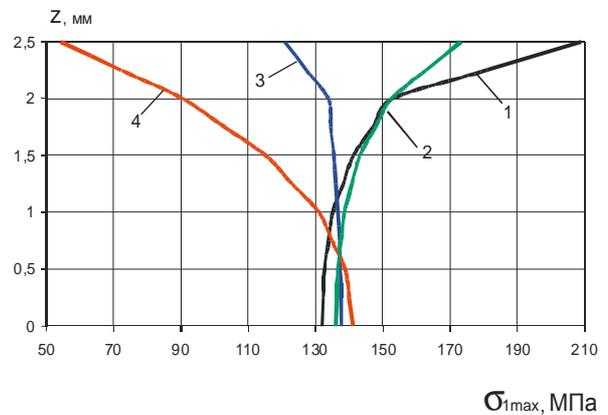


б

Рисунок 22 – Характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине в различных сечениях полосы при уровне растягивающих напряжений $\sigma_{\dot{\alpha}\dot{\delta}}^0 = 150$ МПа

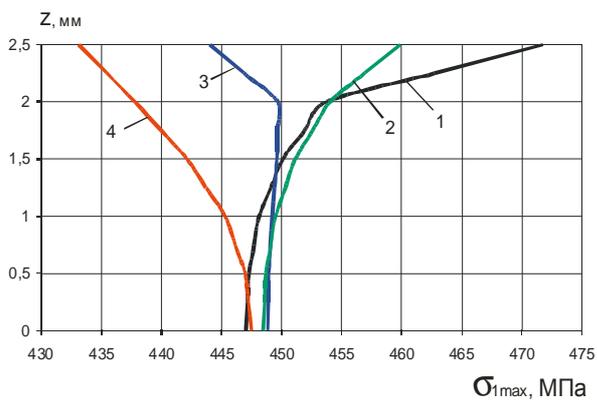


в

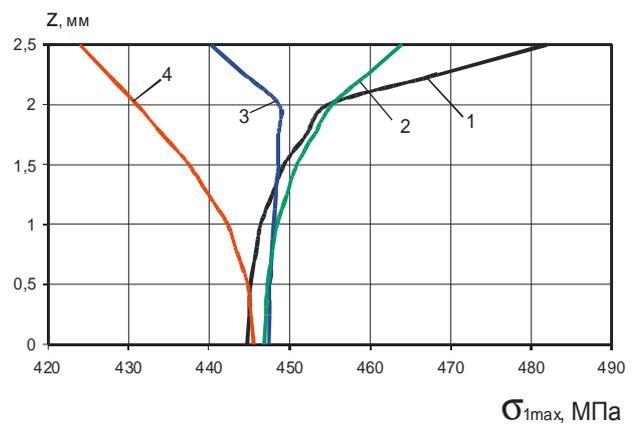


г

Рисунок 23 – Характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине в различных сечениях полосы при уровне растягивающих напряжений $\sigma_{\dot{\alpha}\dot{\delta}}^0 = 150$ МПа



а



б

Рисунок 24 – Характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине в различных сечениях полосы при уровне растягивающих напряжений $\sigma_{\dot{\alpha}\dot{\delta}}^0 = 450$ МПа

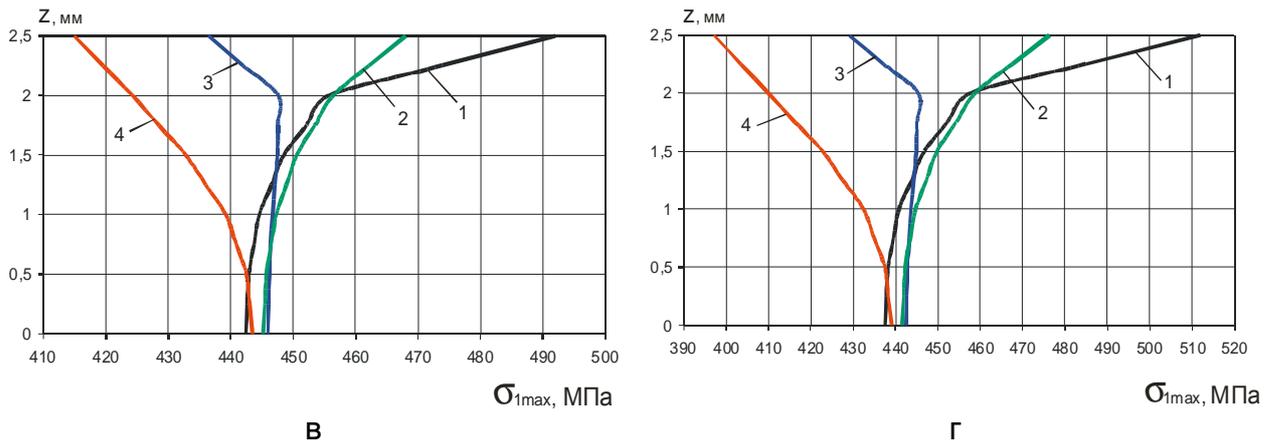
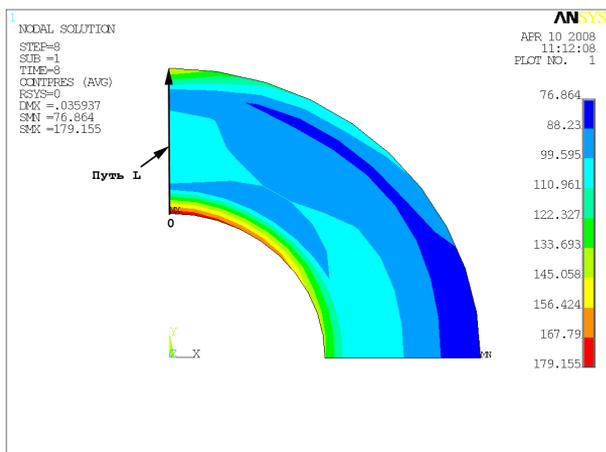


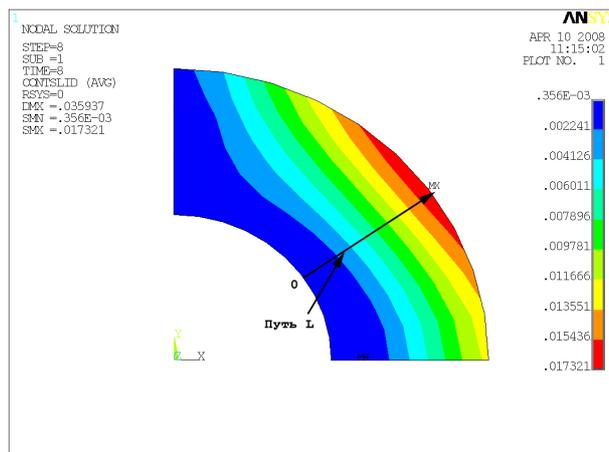
Рисунок 25 – Характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине в различных сечениях полосы при уровне растягивающих напряжений $\sigma_{\dot{a}\dot{d}}^0 = 450$ МПа

Анализируя характер распределения главных растягивающих напряжений по толщине в различных сечениях полосы, следует отметить, что наблюдается изменение напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое полосы. В сечениях, расположенных под шайбой, максимум напряжений достигается в точке, расположенной на нейтральной оси полосы, а в сечениях за пределами границы контакта полосы с шайбой максимум напряжений достигается в точке, расположенной на поверхности. Это свидетельствует об изменении амплитуды напряжений в полосе при циклическом нагружении и возникновении вероятного усталостного разрушения полосы в зоне на границе контакта ее с шайбой.

При рассмотрении механизма фреттинг-коррозии большое значение имеет величина контактных давлений и микросмещений. Определены области максимальных контактных давлений и микросмещений при анализе характера распределения данных величин в зоне контакта (рис. 26 – 28) и получены распределения контактных давлений и микросмещений вдоль данных направлений (рис. 29, 30). Результат приведен для уровня напряжений $\sigma_{\dot{a}\dot{d}}^0 = 450$ МПа и $\sigma_k = 100$ МПа.

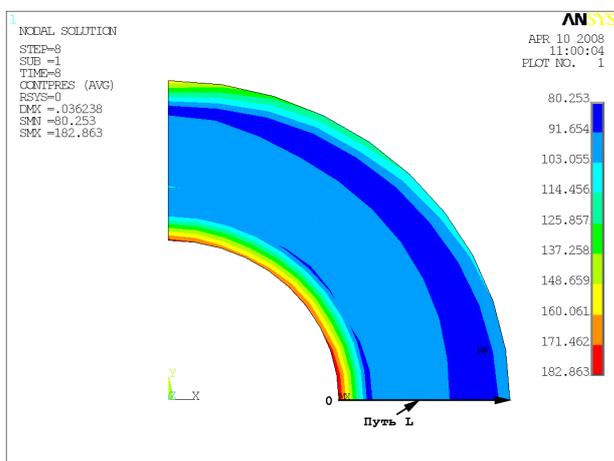


а

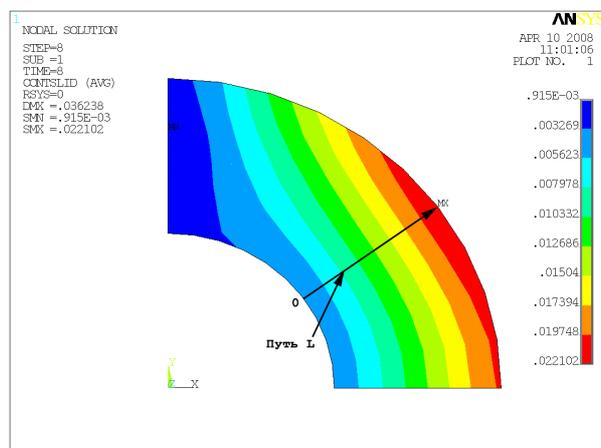


б

Рисунок 26 – Характер распределения контактных давлений (а) и микросмещений (б) в зоне контакта полосы с шайбой, выполненной из сплава ВТ3-1

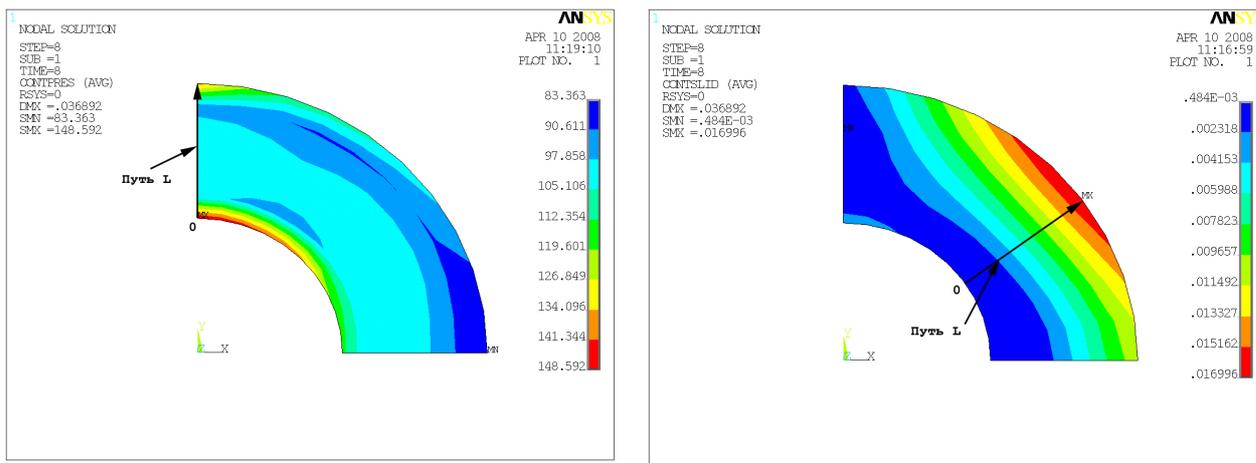


а



б

Рисунок 27 – Характер распределения контактных давлений (а) и микросмещений (б) в зоне контакта полосы с шайбой, выполненной из стали 30XГСА



а

б

Рисунок 28 – Характер распределения контактных давлений (а) и микросмещений (б) в зоне контакта полосы с шайбой, выполненной из сплава Д16АТ

В результате анализа характера распределения контактных давлений (а) и микросмещений (б) в зоне контакта полосы с шайбой установлено, что в зависимости от материала шайб зоны максимальных значений данных величин различны и смещаются в окружном направлении, что свидетельствует о различных областях разрушения при фреттинге. Данные направления L, включающие в себя зоны максимальных значений указанных величин, вдоль которых исследовали распределение контактных давлений и микросмещений, показаны на рис. 29, 30, где приняты следующие обозначения:

1 – материал шайб – титановый сплав ВТ3-1; 2 – материал шайб – сталь 30ХГСА; 3 – материал шайб – сплав Д16АТ.

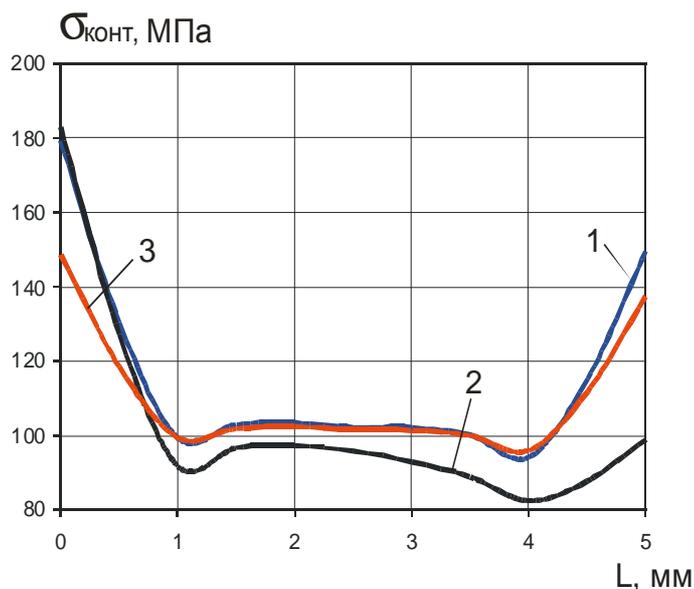


Рисунок 29 – Влияние материала шайб на распределение контактных давлений



Рисунок 30 – Влияние материала шайб на распределение микросмещений

Анализируя результат, отметим, что имеет место неравномерность распределения контактных давлений. Причем степень неравномерности зависит от сочетания материалов контактной пары. Максимальная степень неравномерности равная 1,8 достигается для материалов ВТ3-1 и ВТ6. Наименьшая степень неравномерности 1,47 достигается для материалов Д16АТ и ВТ6. Микросмещения также носят неравномерный характер распределения и достигают максимума на границе контакта полосы с шайбой. Зона максимума смещена в окружном направлении на угол примерно 30...40°.

Выводы:

1. Исследование влияние материала шайб на изменение характеристик локального НДС в титановой пластине. Установлено, что наибольшее влияние проявляется при применении шайбы из титанового сплава ВТ3-1. Количественно это выражается в повышении уровня максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в полосе в 1,09 раза по сравнению с данной величиной для сочетания материалов титан ВТ6-сталь 30ХГСА и титан ВТ6-алюминий Д16АТ. Для максимальных главных растягивающих деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла наблюдается повышение их уровня в 1,05 и 1,08 раза соответственно.
2. Установлено влияние величины контактных давлений на изменение характеристик локального НДС в полосе для всех рассмотренных в работе сочетаний материалов. Повышение величины контактных давлений с 50 до 150 МПа приводит к росту максимальных главных растягивающих напряжений – в 1,04–1,12 раза, деформаций – в 1,04–1,1 раза и удельной

энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла – в 1,15–1,35 раза.

3. Исследовано влияние материала шайб на характер распределения контактных давлений и микросмещений.
4. Наблюдается неравномерность в характере распределения главных растягивающих напряжений по толщине гладкой полосы в различных ее сечениях в зоне контакта полосы с шайбой. Это свидетельствует о локальном изменении амплитуды циклических напряжений в данных сечениях. Степень неравномерности распределения главных растягивающих напряжений по толщине достигает значений 1,05...1,58 в зависимости от величины контактных давлений и уровня нагружения. Причем в сильной степени проявление неравномерности наблюдается при малых уровнях нагружения и больших величинах контактных давлений.
5. Характеристики локального НДС гладкой полосы с прижатыми к ней шайбами являются одним из факторов, учитываемых при прогнозировании усталостной долговечности. Другим фактором является фреттинг-коррозия.

Список литературы

1. Гребеников А.Г., Клименко В. Н. Сопротивление усталости титанового сплава ВТ6 // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2005. – Вып. 42(3). – С. 37–46.

2. Гребеников А.Г., Клименко В. Н. Методика определения влияния фреттинг-коррозии на усталостную долговечность гладких конструктивных элементов из титанового сплава ВТ6 // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2005. – Вып. 29. – С. 57–68.

3. Гребеников А.Г., Клименко В. Н. Сопротивление усталости полосы с отверстием из титанового сплава ВТ6 в условиях фреттинг-коррозии // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2006. – Вып. 30. – С. 80–89.

4. Авиационные материалы: В 9 т. / Под общей ред. д-ра техн. наук Р.Е. Шалина. – М.: ОНТИ, 1983. Т. 5. Магниево-титановые сплавы – 585 с.

5. Авиационные материалы: В 9 т. / Под общей ред. д-ра техн. наук Р.Е. Шалина. – М.: ОНТИ, 1983. Т. 1. Конструкционные стали – 431 с.

6. Авиационные материалы: В 9 т. / Под общей ред. д-ра техн. наук Р.Е. Шалина. – М.: ОНТИ, 1983. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы – 350 с.