

В. С. Жернаков, Т. Н. Мардимасова, М. Р. Арсланов

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗ НАНОМАТЕРИАЛА

Выполнено моделирование процесса нагружения элементов конструкций с концентраторами напряжений из чистого и наноструктурного титановых сплавов Ti-6Al-4V. Формирование остаточных напряжений рассмотрено на примере однородных пластин с отверстием при одноосном растяжении и последующей их разгрузке, а также на пластинах с наличием наноструктурного слоя вокруг отверстия. Изучено влияние толщины слоя на характер распределения полей напряжений при растяжении и величину остаточных напряжений. Проанализированы особенности формирования остаточных напряжений в пластинах, выполненных из сплава Ti-6Al-4V и пластинах с наноструктурным слоем в зависимости от уровня растягивающих нагрузок. *Остаточные напряжения; титановый сплав Ti-6Al-4V; наноструктурный титановый сплав Ti-6Al-4V; зоны концентрации; моделирование процессов*

В авиационных конструкциях можно выделить группу особо ответственных элементов конструкций. К числу таких деталей относятся пластины с отверстиями и выточками, замковые соединения лопаток турбомашин, зубья зубчатых передач, шлицевых соединений и другие конструкции.

Рассмотрим особенности напряженного состояния и концентрации напряжений около отверстий. Такой концентратор напряжений, имеющий конструктивное или технологическое назначение, встречается во многих деталях машин (пластинах, стержнях, оболочках, дисках и т.д.). Вопросам расчета концентрации напряжений около отверстий посвящено большое число работ. Однако наиболее полно эта задача решена в упругой постановке, менее детально – в упругопластической области и в условиях пластичности для деталей из легированных сталей, алюминиевых и титановых сплавов [1, 2].

В данной работе рассмотрена задача определения остаточных напряжений в пластинах с центральным круговым отверстием, выполненных из чистого наноструктурного материала (материал с ультромелкозернистым (УМЗ) слоем, с размером зерна меньше 100 нанометров), а также пластин с наличием наноструктурного кольцевого слоя при их осевом растяжении и последующей разгрузке. В качестве материалов были выбраны чистый и наноструктурный сплавы Ti-6Al-4V [1]. На рис. 1 представлены диаграммы напряжений этих материалов.

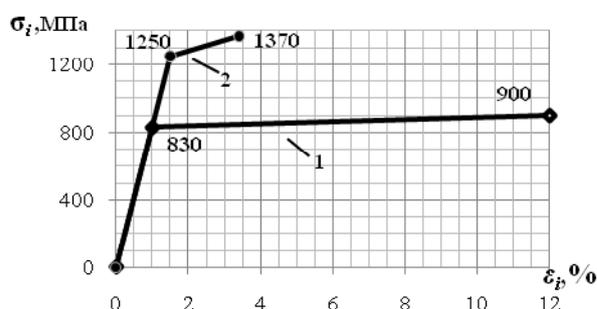


Рис. 1. Диаграммы напряжений для материалов: кривая 1 – чистый сплав Ti-6Al-4V, кривая 2 – наноструктурный титановый сплав Ti-6Al-4V

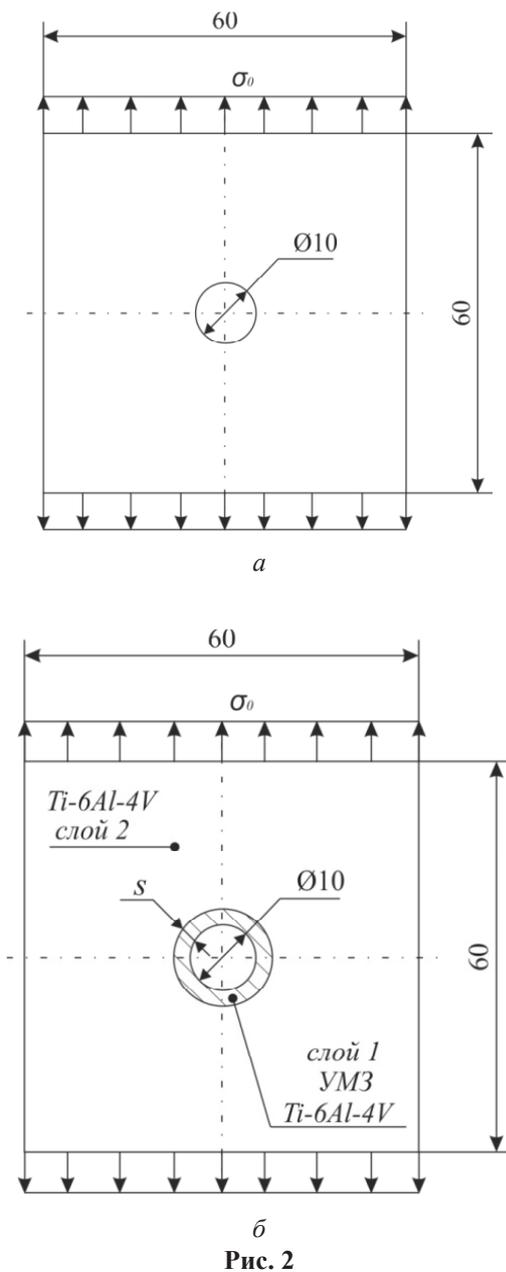
В табл. 1 приведены физико-механические характеристики материалов (E – модуль упругости первого рода; ν – коэффициент Пуассона; σ_T , $\sigma_{ПЧ}$ – пределы текучести и прочности материала соответственно).

Таблица 1

Материал	$E \times 10^5$, МПа	ν	σ_T , МПа	$\sigma_{ПЧ}$, МПа
титановый сплав Ti-6Al-4V	0,83	0,32	830	900
наноструктурный сплав Ti-6Al-4V	0,83	0,32	1250	1370

Объектом исследования являлись пластины конечных размеров 60×60 мм с центральным круговым отверстиями диаметром \varnothing 10 мм (рис. 2). Изучению подвергались пластины:

- выполненные из чистого сплава Ti-6Al-4V (рис. 2, а);
- выполненные из наноструктурного сплава Ti-6Al-4V (рис. 2, а);
- с наличием кольцевого слоя из наноструктурного сплава Ti-6Al-4V (рис. 2, б). Толщина слоя s варьировалась от 0,5 мм до 3 мм с интервалом 0,5 мм.



На рис. 3 приведена расчетная схема для одноосного растяжения пластины нагрузкой σ_0 . При составлении расчетных схем была использована твердотельная модель в виде 1/4 части пластины, на которую наложены следующие граничные условия: в силу симметрии перемещения точек, лежащих на оси Y , в направлении оси X равно 0 ($u = 0$); перемещения точек, лежащих на оси X , в направлении оси Y равно 0 ($v = 0$).

Численное решение выполнено методом конечных элементов [3] с применением программно-вычислительного комплекса Ansys в плоской постановке. В качестве конечного элемента выбран треугольный элемент [4].

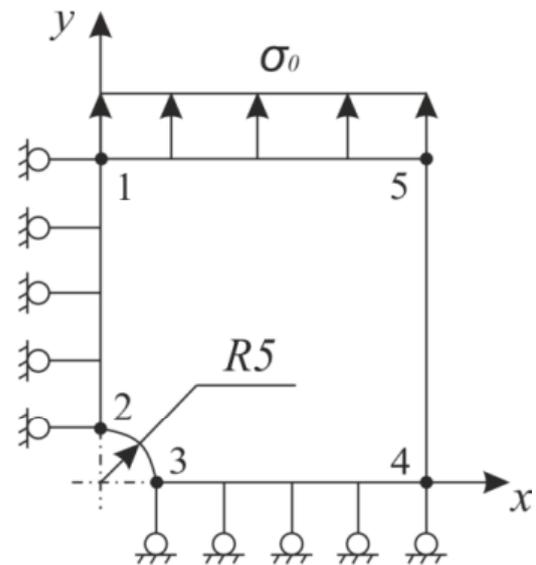


Рис. 3. Расчетная схема

Известно [5, 6], что отверстия являются концентратором напряжений и вокруг них наблюдается большой градиент распределения напряжений. В связи с этим исследуемая область покрывалась неравномерной треугольной сеткой. Так? в области отверстия круговая зона толщиной 1 мм разбивалась на конечные элементы треугольной формы с длиной ребра 0,05 мм. Следующая зона толщиной 2 мм – на треугольные элементы с длиной ребра 0,1 мм. Остальная часть пластины состояла из аналогичных элементов с длиной ребра 0,2 мм. Размеры длин ребер треугольных конечных элементов подбирались путем опытного разбиения и сравнения полученных данных с известными результатами.

Для уточнения решения в узловых точках, расположенных вблизи поверхности конструкции и стыка слоев в пластине с наноструктурным слоем, использовалось усреднение с весом [7].

При задании свойств материала в программно-вычислительном комплексе Ansys, модель материала выбиралась как билинейное изотропное упрочнение [8].

На рис. 4, *a–в* в качестве примера приведены эпюры нормальных осевых напряжений σ_y в сечении, совпадающем с осью X , при одноосном растяжении нагрузкой $\sigma_0 = 500$ МПа пластин из чистого сплава Ti-6Al-4V, наноструктурного сплава Ti-6Al-4V с наличием слоя из наноструктурного сплава Ti-6Al-4V толщиной $s = 1$ мм соответственно.

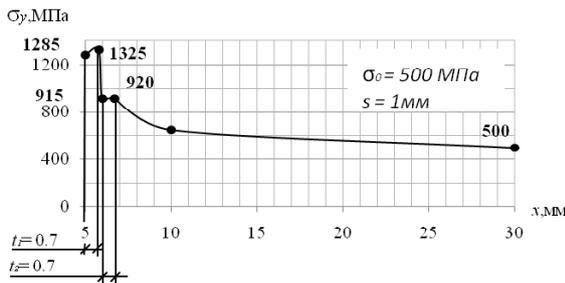
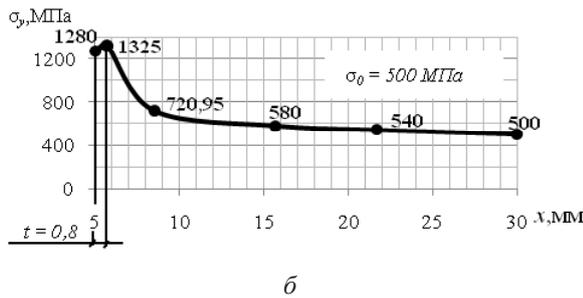
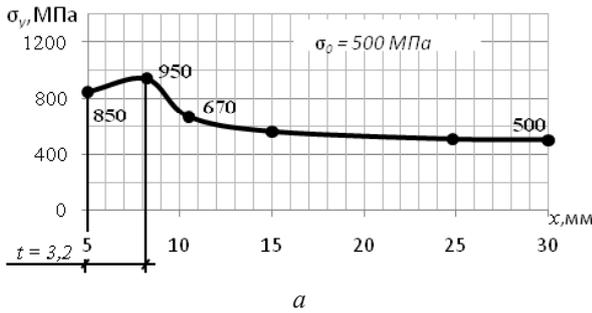


Рис. 4

Как видно из рис. 4, а пластические деформации распространяются в тело пластины на глубину $t = 3,2$ мм и при этом осевые напряжения в этой точке достигают максимального значения $\sigma_y = 950$ МПа. Развитие зоны пластических деформаций связано с возникновением в данном месте плоского напряженного состояния с одинаковыми знаками главных напряжений, что затрудняет пластическое течение и делает эти слои более жесткими. В случае пластины из наноструктурного материала (рис. 4, б), глубина распространения на порядок меньше ($t = 0,8$ мм), а уровень максимальных напряжений составляет $\sigma_y = 1325$ МПа.

Особый интерес представляет изучение характера распределения напряжений σ_y при осевом нагружении пластины с наличием наноструктурного слоя. На рис. 4, в проиллюстрирован характер распределения осевых напряжений σ_y . Видно, что в слое 1 глубина проникновения пластических деформаций составля-

ет 0,8 мм, при этом максимум напряжений равен $\sigma_y = 1325$ МПа, во втором слое пластины также прослеживается возникновение максимума напряжений, равного $\sigma_y = 920$ МПа. Отметим, что на границе слоев происходит резкий спад уровня напряжений. Таким образом, в пластине наблюдается две зоны пластических деформаций, где первая развивается в слое из наноструктурного материала и распространяется вглубь пластины на $t_1 = 0,8$ мм. Вторая зона пластичности возникает во второй части пластины из чистого сплава Ti-6Al-4V, глубина которой равна $t_2 = 0,8$ мм от границы слоев 1 и 2. Интересно отметить, что участок между зонами пластичности работает в условиях упругого деформирования.

Для оценки работоспособности элементов конструкций в условиях пластичности (особенно при циклическом нагружении) важно знать значения коэффициентов концентрации напряжений α_σ .

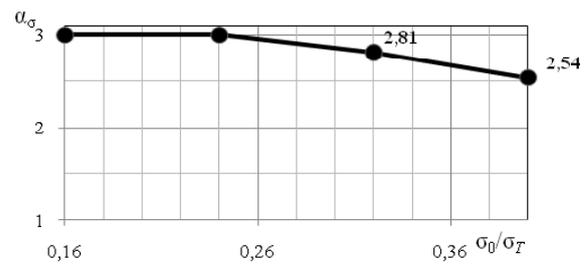
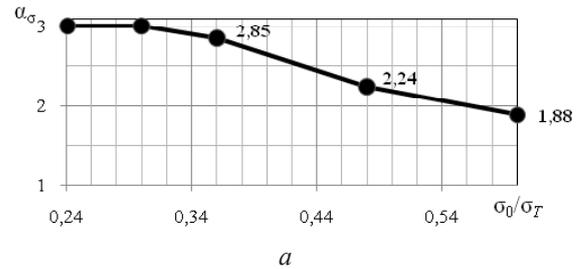
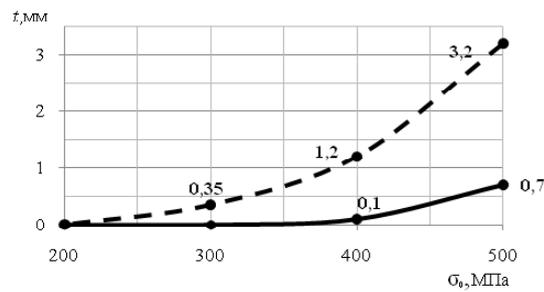


Рис. 5

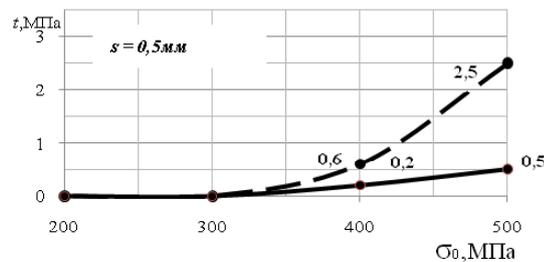
На рис. 5, а, б приведены зависимости α_σ от отношения растягивающего напряжения на невозмущенной границе к пределу текучести материала (σ_0 / σ_T) в пластинах из чистого Ti-6Al-4V и наноструктурного Ti-6Al-4V соответственно.

Анализ результатов показал, что упругое деформирование пластины из чистого сплава Ti-6Al-4V происходит при значениях отношения σ_0 / σ_T от 0 до 0,3 (рис. 5, а). Дальнейшее увеличение приводит к развитию неупругих деформаций, а значения коэффициента концентрации α_σ напряжений уменьшается до 1,88 при значении отношения σ_0 / σ_T равного 0,6.

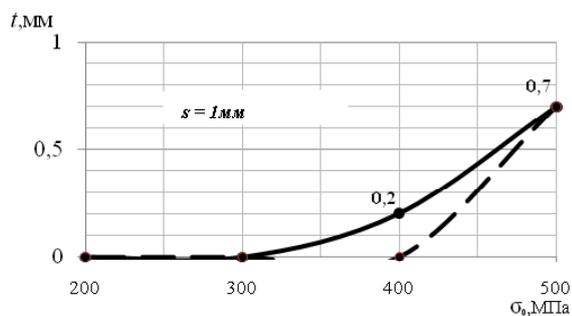
Для пластин из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V упругое деформирование происходит при значениях отношения σ_0 / σ_T от 0 до 0,24 (рис. 5, б). Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к развитию пластических деформаций и уменьшению значения коэффициента концентрации напряжений α_c до 2,54 при $\sigma_0 / \sigma_T = 0,4$.



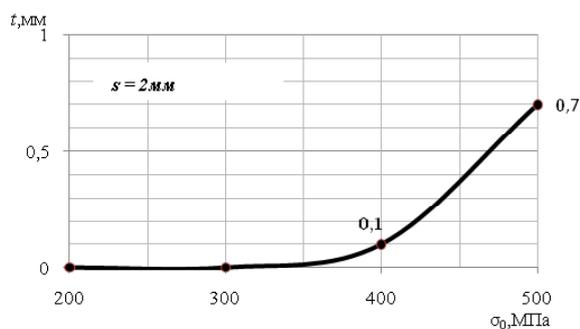
а



б



в



г

Рис. 6

Оценено влияние величины нагружения σ_0 на глубину распространения пластических деформаций t в тело исследуемого объекта.

На рис. 6 показаны зависимости глубины t распространения пластических деформаций вглубь тела пластин, выполненных из материалов различного структурного состояния, от величины растягивающей нагрузки σ_0 . Так, в случае растяжения пластины из чистого сплава Ti-6Al-4V (рис. 6, а – пунктирная линия) возникновение зоны пластических деформаций прослеживается уже при величинах $\sigma_0 > 200$ МПа, дальнейший рост нагрузки приводит к увеличению глубины проникновения t и составляет, например, 3,2 мм при $\sigma_0 = 500$ МПа.

Подобная зависимость наблюдается и при растяжении пластины из наноструктурного материала (рис. 6, а – сплошная линия), при этом рост зоны пластического деформирования начинается при значительно больших растягивающих нагрузках. Так, при $\sigma_0 = 500$ МПа глубина распространения составляет $t = 0,7$ мм, что приблизительно в 5 раз меньше, чем в предыдущем примере.

На рис. 6, б–г показана зависимость глубины распространения пластических деформаций в пластинах с УМЗ слоем от величины нагружения σ_0 . Сплошной линии соответствует глубина проникновения в наноструктурном слое (слой 1), пунктирной линии – в чистом сплаве Ti-6Al-4V (слой 2).

Интересно отметить, что при ширине наноструктурного слоя $s = 0,5$ мм и растягивающей нагрузке $\sigma_0 = 500$ МПа пластическое течение наблюдается во всем слое и переходит в чистый сплав на глубину $t = 2,5$ мм (рис. 6, в). Однако увеличение толщины наноструктурного сплава приводит к снижению уровня t в чистом сплаве Ti-6Al-4V. Так, при $s = 2$ мм образование зоны пластического течения наблюдается только в наноструктурном и отсутствует во втором слое пластины (рис. 6, г).

Отметим, что при толщине наноструктурного $s = 1$ мм в пластине наблюдается образование двух зон пластического течения. Первая возникает в наноструктурном слое и при $\sigma_0 = 500$ МПа распространяется на $t = 0,7$ мм, вторая – в чистом сплаве и составляет также 0,7 мм.

Заметим, что при этом же уровне σ_0 в пластине из сплава Ti-6Al-4V t составляет 3,2 мм, а в пластине из наноструктурного сплава – 0,7 мм (рис. 6, а).

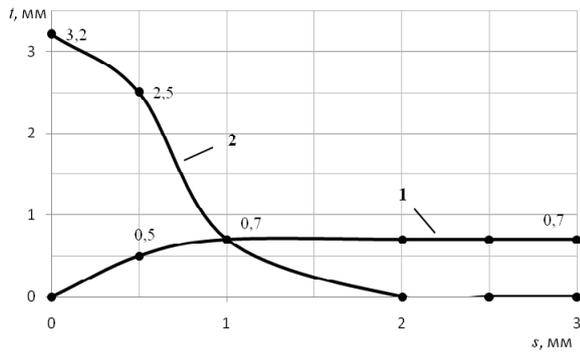


Рис.7. Зависимость глубины распространения зоны пластических деформаций от толщины наноструктурного слоя: кривая 1 – глубина пластического течения в наноструктурном слое; кривая 2 – в слое из чистого сплава Ti-6Al-4V

На рис. 7 приведен график зависимости глубины распространения зон пластической деформации t в тело пластины от толщины наноструктурного слоя при растягивающей нагрузке $\sigma_0 = 500$ МПа.

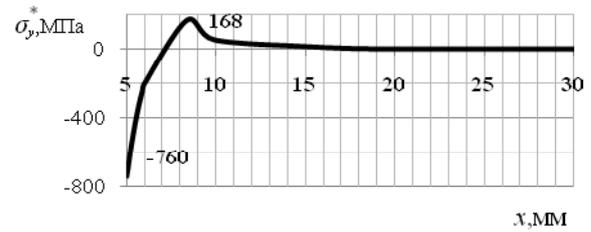
Видно, что при отсутствии наноструктурного слоя пластические деформации распространяются в тело пластины на глубину 3,2 мм. При наличии наноструктурного слоя толщиной $s = 0,5$ мм наблюдается уменьшение зоны пластических деформаций в первом слое до $t_1 = 2,5$ мм, а во втором слое пластическое течение распространяется на всю толщину слоя и достигает значения $t_2 = 0,5$ мм. Отметим, что при $s = 1$ мм зоны пластического течения в обоих слоях одинаковые $t_1 = t_2 = 0,7$ мм.

Дальнейшее увеличение толщины слоя приводит к уменьшению глубины распространения пластического течения в слое 2 до нуля. При этом уровень в первом слое остается неизменным.

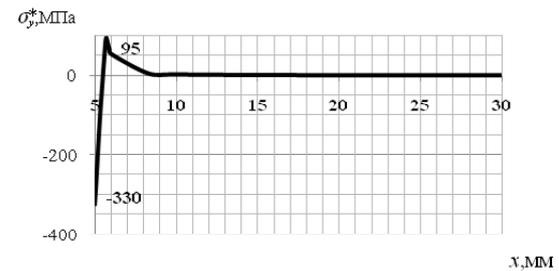
После разгрузки в теле пластины, вследствие неоднородности деформаций возникают остаточные напряжения и деформации.

На рис. 8, а показан характер распределения остаточных осевых напряжений σ_y^* в пластине из чистого сплава Ti-6Al-4V, в результате осевого растяжения интенсивностью $\sigma_0 = 500$ МПа.

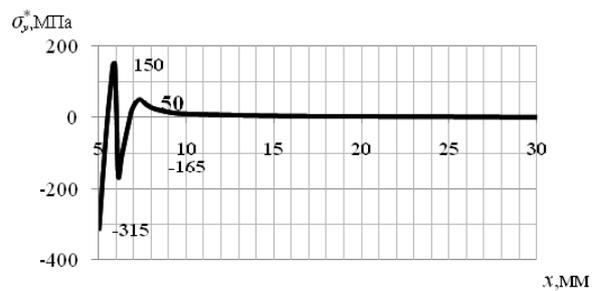
Видно, что наибольшие сжимающие остаточные напряжения образуются на контуре отверстия в точке пересечения контура отверстия с осью X и достигают значения $\sigma_y^* = 760$ МПа. Растягивающие остаточные напряжения действуют в области однородного напряженного состояния и их величина существенно ниже сжимающих и достигают максимального значения, равного 170 МПа.



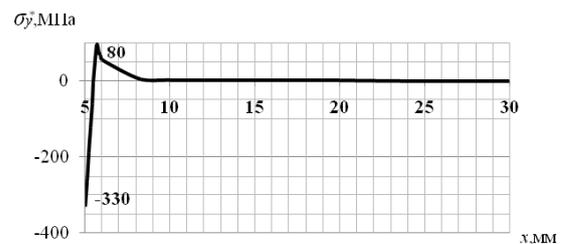
а



б



в



г

Рис. 8

Подобный характер распределения остаточных напряжений наблюдается и после осевого нагружения $\sigma_0 = 500$ МПа пластины из наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V (рис. 8, б). Отметим, что происходит только изменение уровня напряжений, так величина сжимающих σ_y^* падает до 330 МПа, а растягивающих – до 95 МПа.

Особый интерес представляет характер распределения полей остаточных напряжений в пластине из чистого сплава с наличием наноструктурного кольцевого слоя по внутреннему диаметру отверстия (рис. 8, в).

Видно, что в пластине характер распределения остаточных осевых напряжений имеет 2 участка с сжимающими и 2 участка с растягивающими напряжениями. При этом их уровень составляет 315 и 165 МПа для сжимающих, и 150 и 50 МПа для растягивающих. Данное различие σ_y^* возникает ввиду отличия физико-механических свойств материала в наноструктурном слое и в остальном объеме тела пластины.

Заметим, что такой характер распределения полей остаточных осевых напряжений прослеживается и в отношении пластин с наличием слоя толщиной от 0,5÷2 мм. Однако уже при $s = 2$ мм распределение σ_y^* имеет другой характер, аналогичный характеру распределения осевых остаточных напряжений в пластинах, выполненных из материалов с однородной структурой (рис. 8, з). При этом уровень остаточных напряжений близок к значениям σ_y^* в пластине из наноструктурного материала.

Для наглядности в табл. 2 приведены сводные данные по результатам исследования зависимости изменения остаточных напряжений в пластине от величины растягивающей осевой нагрузки.

Таблица 2

σ_0 , МПа		200	300	400	500
Наноструктурный титановый сплав Ti-6Al-4V					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	-30	-330
	Растягивающие	0	0	5	95
Титановый сплав Ti-6Al-4V					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	-130	450	760
	Растягивающие	0	20	20	170
Пластина из титанового сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя $s = 0,5$ мм					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	25/135	300/370
	Растягивающие	0	0	40/25	15/140
Пластина из титанового сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя $s = 1$ мм					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	25	315/190
	Растягивающие	0	0	6	150/50
Пластина из титанового сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя $s = 1,5$ мм					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	25	320/35
	Растягивающие	0	0	6	150/50
Пластина из титанового сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя $s = 2$ мм					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	30	330
	Растягивающие	0	0	5	80
Пластина из титанового сплава Ti-6Al-4V с наличием наноструктурного слоя $s = 3$ мм					
σ_y^* , МПа	Сжимающие	0	0	30	330
	Растягивающие	0	0	3	80

Анализ приведенных данных показывает, что в пластине с наноструктурным слоем с увеличением толщины слоя до 2 мм в пластине происходит рост уровня сжимающих осевых напряжений в наноструктурной зоне до 328 МПа и спад до 0 в остальной области пластины. Растягивающие осевые напряжения в УМЗ слое составляют 13 МПа, в остальной части пластины 136 МПа. При увеличении толщины до 2 мм – 80 и 0 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ильющин А. А.** Пластичность. Основы общей математической теории. М.: АН СССР, 1963.
2. **Братухин А. Г., Иванов Ю. Л.** Современные технологии авиастроения. М.: Машиностроение, 1999.
3. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
4. **Мавлютов Р. Р.** Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. М.: Наука, 1981.
5. **Биргер И. А.** Общие алгоритмы решения задач упругости, пластичности и ползучести, // Успехи механики деформируемых сред. М.: Наука, 1976.
6. **А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А.** ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. М.: Машиностроение, 2003.
7. **Басов К. А.** ANSYS справочник пользователя. М.: Машиностроение, 2005.

ОБ АВТОРАХ

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

Мардимасова Тамара Николаевна, доц. той же каф. Дипл. инж.-электромеханика (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по динамике и прочности (УАИ, 1977). Иссл. в обл. механики деформируемых тел и конструкций.

Арсланов Марат Рашитович, аспирант той же кафедры. Дипл. инж.-мех (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. механики деформируемых тел и конструкций.