УДК 621.436: 378.016

ЯК ВПЕВНИТИ СТУДЕНТА, ЩО ДОСКОНАЛЕ ЗНАННЯ ПАКЕТА ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ НЕ Є ЗАЛОГОЮ УСПІХУ. МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПОРШНЯ ДВОТАКТНОГО ДВИГУНА

О. В. Білогуб, Є. В. Марценюк, М. О. Максимова
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Анотація: *На даний час моделювання напружено-деформованого стану вузлів, деталей складних механічних систем є невід'ємною частиною інженерного буття. Основним на сьогодні методом інженерного аналізу є метод скінченних елементів, застосовувати який вчать практично в усіх технічних вишах світу. В процесі викладання ми зіткнулися з тим, що в деяких випадках студенти масово помиляються в основному при визначені «закріплень» і результати такого моделювання неприємно вражають. У даному труді автори на прикладі поршня двотактного двигуна проаналізували типові помилки, що виникають під час його моделювання, показали, що при таких самих навантаженнях результат моделювання може різнитися за напруженнями до трьох разів і деформований стан при цьому кожен раз інший. Показано, що перехід до формальних закріплень в даному випадку може суттєво допомогти при моделюванні напружено-деформованого стану такої деталі, як поршень.*

Ключові слова*: поршень; силове навантаження; складний напружено-деформований стан; деформація поршня.*

HOW TO ASSURE A STUDENT THAT PERFECT KNOWLEDGE OF THE APPLICATIONS PACKAGE IS NOT A GUARANTEE OF SUCCESS. MODELING OF TENSION STATE OF A TWO-STROKE PISTON

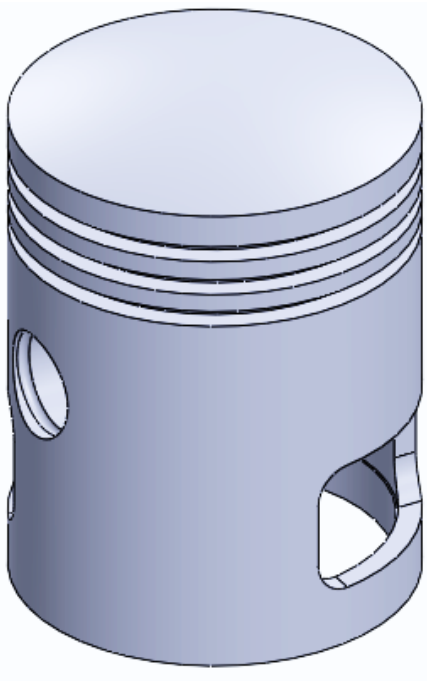
O. Bilohub, Ye. Martsenyuk, M. Maksymova
M. Zhukovsky National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

Abstract: *Currently, modeling the stress-strain state of components and parts of complex mechanical systems is an integral part of engineering life. The main method of engineering analysis today is the finite element method, which is taught in almost all technical universities in the world. In the process of teaching, we were faced with the fact that in some cases, students are massively mistaken mainly in determining the "fixations" and the results of such modeling are unpleasant. In this paper, the authors analyzed the typical errors that occur during modeling on the example of a two-stroke engine piston. It is shown that at the same loads the simulation result can differ in stresses up to three times and the deformed state is different each time. It is shown that the transition to formal fastenings in this case can significantly help in modeling the stress-strain state of a part such as a piston.*

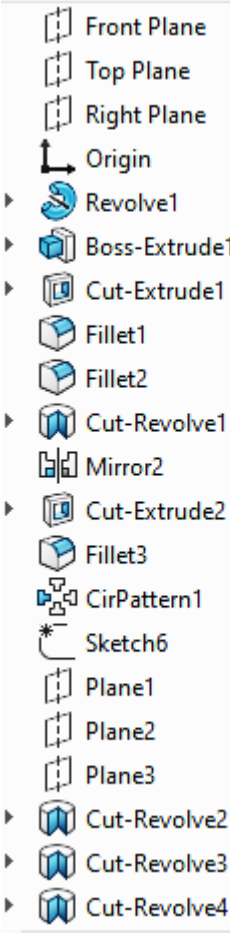
Keywords: *piston; power load; complex stress-strain state; deformation of the piston.*

Відомо, що поршень є однією з деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), яка забезпечує його працездатність і ресурс. У роботах [1–5] дуже докладно проаналізовано практику проектування поршнів, запропоновано методи дослідження і синтезу конструкцій (включаючи синтез геометрії бічної

поверхні), що втілено у виробництво. Один з авторів цього допису є розробник методу синтезу [2] і з іншими співавторами – викладачі курсів «геометричного моделювання» та «авіаційних поршневих двигунів» в університеті.



а)



б)

Рис. 1 – Геометрична модель (а) та дерево побудови (б) поршня двотактного двигуна.

В процесі викладання ми зіткнулися з проблемою, яка пов’язана з недооцінкою студентами процесів, що протікають в поршні (двигуні) і переоцінкою можливостей пакетів прикладних програм інженерних розрахунків. Якщо здібні студенти досить легко виконують тривимірне геометричне моделювання за результатами обміру реальних поршнів, яких на кафедрі є багато, то аналіз складного напруженого стану викликає напруження, але вже в студента. За нашою практикою, а це не менш 10 років впровадження цієї вправи в програму навчальної дисципліни, ні один зі студентів не впорався з аналізом самотужки.

Отже, для пояснення, як саме студенту виконати практичну роботу, було запропоновано в якості прикладу поршень двотактного двигуна (рис. 1), а результат цієї роботи, на наш погляд, є цікавим не тільки як методичний, але і як науковий.

Геометрія. Особливість конструкції поршня полягає в тому, що він не є симетричним, тому до його геометричного моделювання та наступного аналізу не можна в повній мірі застосувати рекомендації, викладені в [1, 5]. Необхідно мати повну модель, а не її чверть, або половину, як це рекомендовано для

більшості поршнів, що виробляються або проектуються. Більш того, цей поршень має дезаксаж пальця (пальцевого отвору), що для побудови геометрії несуттєво, але для аналізу напружено-деформованого стану є вкрай важливим. В таблиці 1 та на рис.1 наведено деякі параметри, дерево побудови та геометричну модель поршня.

Як видно з рис. 1 а, б, геометрія поршня є простою[1], для побудови моделі знадобилось всього 17 елементарних операцій. Особливість конструкції поршня двотактного двигуна – це наявність вікон для газообміну.

Таблиця 1 – Геометричні параметри поршня і параметри навантаження.

Номінальний діаметр, мм	Діаметр пальцевого отвору, мм	Висота поршня, мм	Компресійна висота, мм	Дезаксаж[2], мм	Тиск в циліндрі, що взято для аналізу, МПа
58,8	16	73,6	36,3	0,5	4,0

Аналіз напруженого стану. Загальновідомо, що провести аналіз міцності та деформованого стану такої складової ДВЗ, як поршень, аналітичними методами неможливо. Такий аналіз передбачає застосування сучасних чисельних методів моделювання, наприклад, методу скінченних елементів, на якому базується SolidWorks Simulation та інші пакети прикладних програм. Наразі він є тим, який супроводжує практично всі професійні дисципліни освітньої програми, що акредитована по кафедрі конструкції авіаційних двигунів ХАІ.

Щоб провести аналіз напруженого-деформованого стану потрібно визначитися з навантаженнями та реакціями, що притаманні тому чи іншому стану об’єкта, що підлягає аналізу. Реакції на навантаження, як правило, замінюються кріпленнями, які їх (реакції) і визначають. Формально наші кріплення повинні «відібрати» у системи 6 ступенів свободи – 3 переміщення і 3 повороти відносно головних вісей основної системи координат моделі. Для студента визначення кріплень і є найбільш складним питанням при аналізі.

Цей приклад розрахунку проведено тільки для навантаження тиском, інерційними навантаженнями знехтувано.

Більша частина студентів першим кроком пропонувала фіксовано закріпити поршень за нижню грань, що навпроти діючого навантаження (рис. 2, а). Така фіксація не дозволяє змінювати геометрію грані і розташування її в просторі. Що з цього вийшло показано на рисунку 2, б. Тут і далі масштаб деформацій – 300:1.

Звісно, що така картинка студентів шокує, вони починають думати і наступний пропонований варіант – закріплення за пальцеві отвори в бобишках, але теж фіксоване (рис. 3, а). Результат аналізу подано на рис. 3, б.

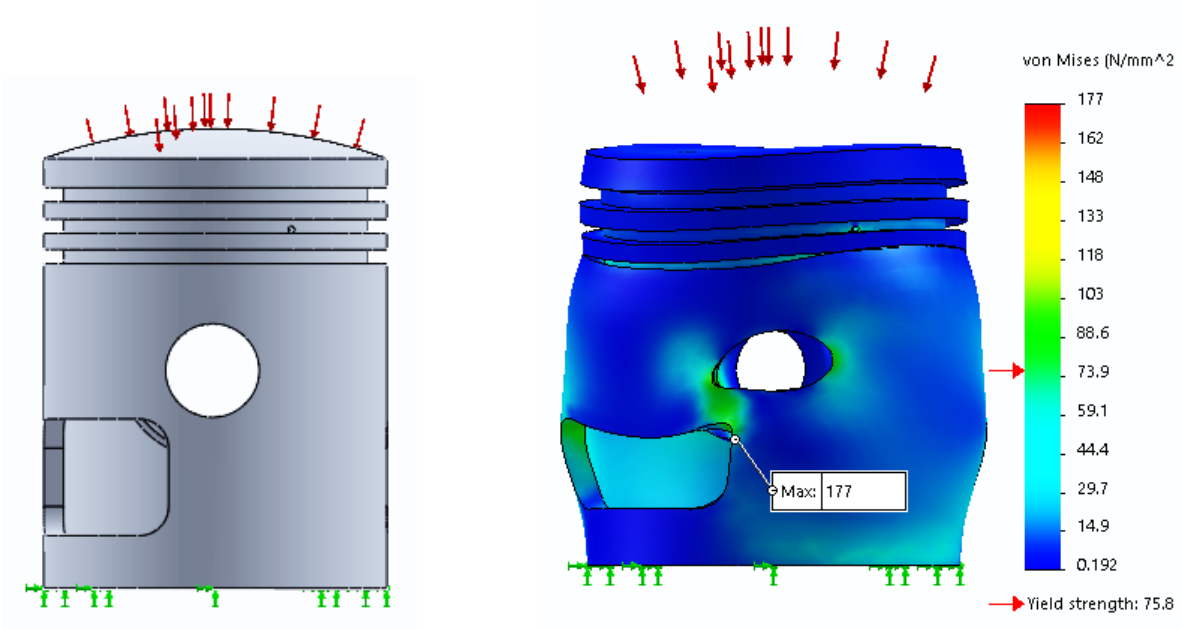
---

[1] Для справки – геометричні моделі деяких реальних поршнів мають 100 і більше елементарних команд.

[2] Дезаксаж в поршні присутній, але його значення може відрізнятися від показаного на 30 % у більшу сторону.

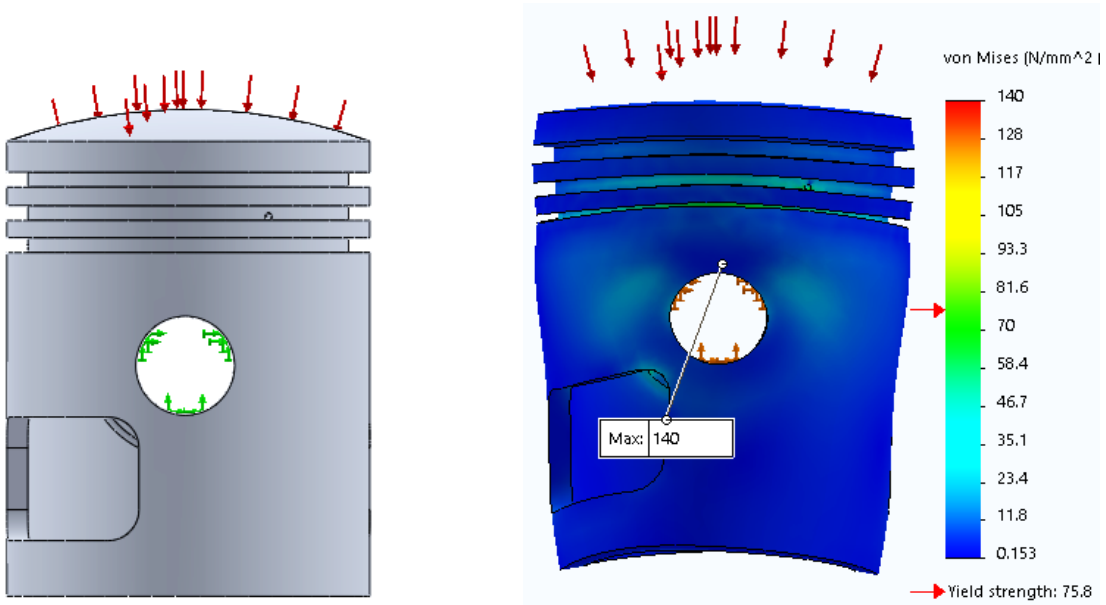
Такий результат задовольняє більшість студентів, але вони не бачать очевидної помилки. Тому потрібно тлумачення, що нижня (по рисунках) частина бобишок не сприймає навантаження від тиску, і вся реакція від поршневого пальця зосереджена на верхній частині бобишок.

Тож, наступний логічний крок – формування на бобишках, які буде зафіксовано від переміщень і поворотів і проведено розрахунок секторів (у наведеному прикладі ці сектори мають розкриття 70°). Результати цього кроку представлені на рис. 4.



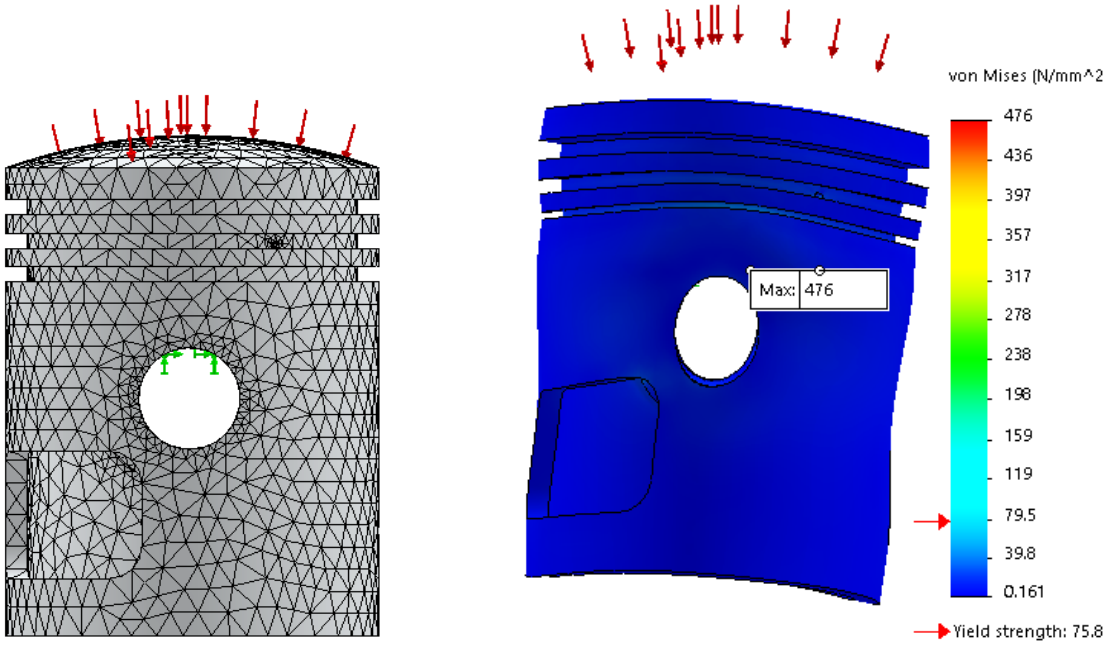
а) б)

Рис. 2 – Навантаження, закріплення (а) та напружено-деформований стан (б) поршня при закріпленні за нижню грань



а) б)

Рис. 3 – Навантаження, закріплення (а) та напружено-деформований стан (б) поршня при фіксації отворів у бобишках



а) б)

Рис. 4 – Навантаження, закріплення (а) та напружено-деформований стан поршня (б) при фіксації секторів в отворах бобишок

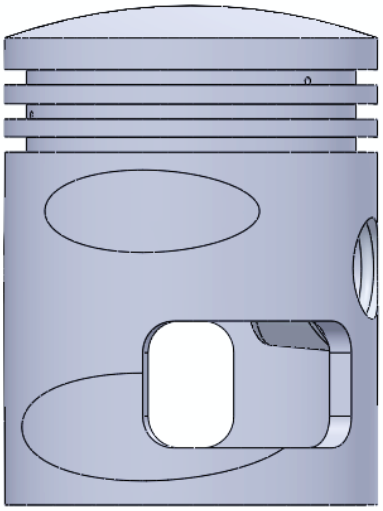
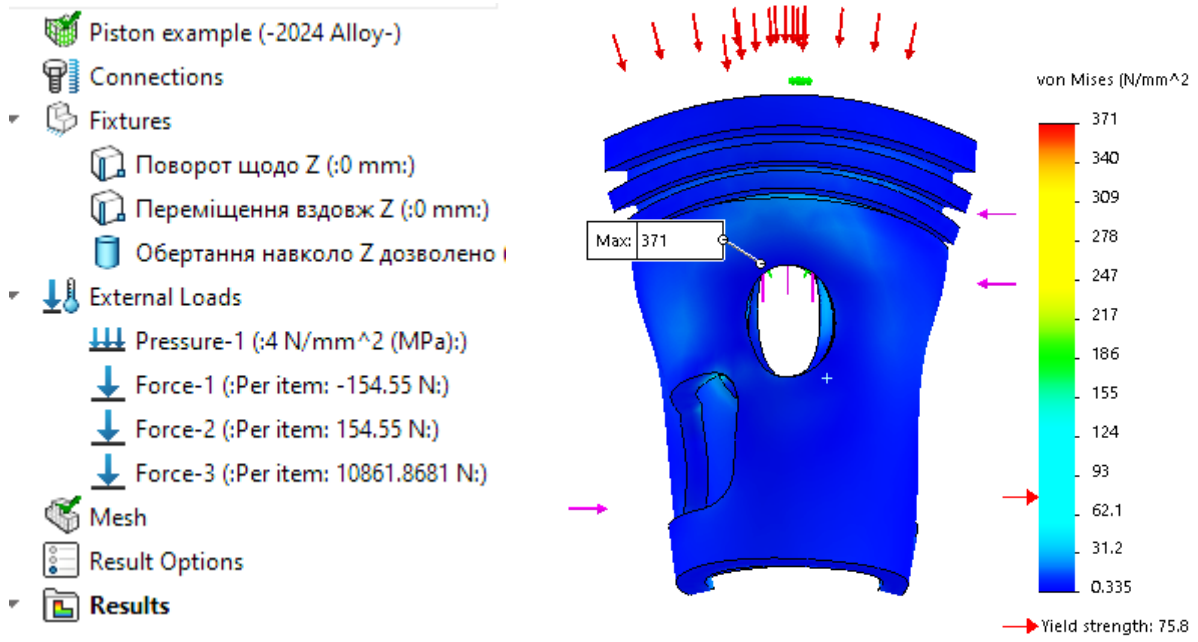


Рис. 5 – Поверхні контактів, що призначено для прикладання сил реакції від дії моменту, пов’язаного з дезаксжем

Зазвичай, саме на цьому кроці деякі просунуті студенти починають помічати, що поршень повертається навколо отвору в бобишці, що є фізично, тому що в поршні з дезаксажем виникає обертаючий момент навколо пальця. Закріплення в нашій моделі і компенсує цей момент. В реальному двигуні момент компенсується поверхнею циліндра, а шарнір в бобишці «вільний». Момент, що виникає від дезаксажу в зазначених умовах аналізу (закріплення),

компенсується дотичними напруженнями на поверхні отворів (рис. 3) або секторів (рис. 4). Ще раз: в реаліях двигуна момент від дезаксажу компенсується парою сил, діючих від дзеркала циліндра на спідницю поршня. Розрахунок цієї пари сил докладно викладено в [5]. Місце прикладання сили та поверхня контакту можуть бути призначені довільно, це пов'язано з профілем поршня, що аналізується, або з профілем, який буде синтезовано за результатами розрахунків. На рис. 5 показано приклад призначення таких поверхонь контакту. Сили, що прикладено, розраховані за балансом діючого навантаження (тиску) і реакцій на поверхні контакту. Потрібно звернути увагу, що в даному випадку нижня (за рисунком) поверхня контакту, що сформована еліпсом, має виріз, який змінює положення центру ваги цієї поверхні. Це повинно бути враховано при обчисленні пари сил. Звісно, що еліпси побудовано як лінії роз'єму і їх на поверхні спідниці буде 4 − 2 зверху і 2 знизу. Пару сил потрібно прикласти правильно! До секторів на бобишках теж прикладемо реакції на дію тиску. Таким чином усі закріплення замінено силами реакцій, розподіленими по поверхням.

На рис. 6 наведено результат розрахунку реакцій і введені закріплення.



а) б)

Рис. 6 – Навантаження, закріплення та напружено-деформований стан поршня при заміні фіксацій реакціями і введенням формальних фіксацій. Force-1, Force-2, Force-3 – реакції, що компенсують момент та тиск відповідно

Але такі умови кріплення та навантаження розрахункової моделі все ще не є коректними, а розрахунковий модуль згенерує сповіщення про помилку, що сталася через недостачу кріплень. Як вже було зазначено, необхідно формально відібрати від системи 6 ступенів свободи. І ми пропонуємо зробити це наступним чином: сектори на бобишках закріпити як шарнір, на внутрішній

поверхні донця поршня зробити дві взаємно перпендикулярні лінії роз'єму, по яких заборонити поворот і зміщення поршня, тобто зафіксувати, як і раніше, всі шість ступенів свободи. Наразі напруження (або їх відсутність) в місцях формального закріплення покаже нам, як добре ми провели аналіз. На рис. 6 показано, як здійснено формальні закріплення, і який вигляд має напружено-деформований стан поршня.

В нашому випадку формальні закріплення на донці поршня коректні, напруження там практично відсутні, але по бобишках не все гаразд (рис. 7), тому що в реальних умовах бобишки деформуються разом з поршневим пальцем.

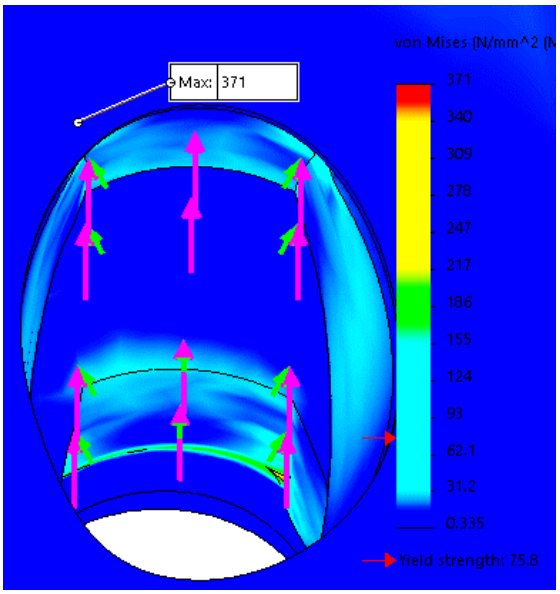


Рис. 7 – Деформації та напруження в зоні бобишок

Для порівняння наведено результати аналізу (рис. 8), що проведено зі збіркою поршня з поршневим пальцем. Видно, що напруження в поршні суттєво менші, ніж у випадках моделювання поршня окремо від суміжного пальця. Найбільші напруження припадають саме на сталевий палець, що має і більші значення міцності матеріалу, ніж поршень з алюміній-кремінного сплаву. Якщо продовжити уточнювати модель, то ми повинні ввести і шатун (як мінімум, верхню голівку), тоді деформація пальця буде близькою до тої, яка є насправді. Щодо часу, який потрібен для розрахунку, то в нашому випадку розрахунок деталі (поршня) займав близько хвилини, а розрахунок збірки – до 20 хвилин при тому, що сітка скінчених елементів досить груба (рис. 4, а), для коректного розрахунку вона повинна бути мінімум втричі густіша.

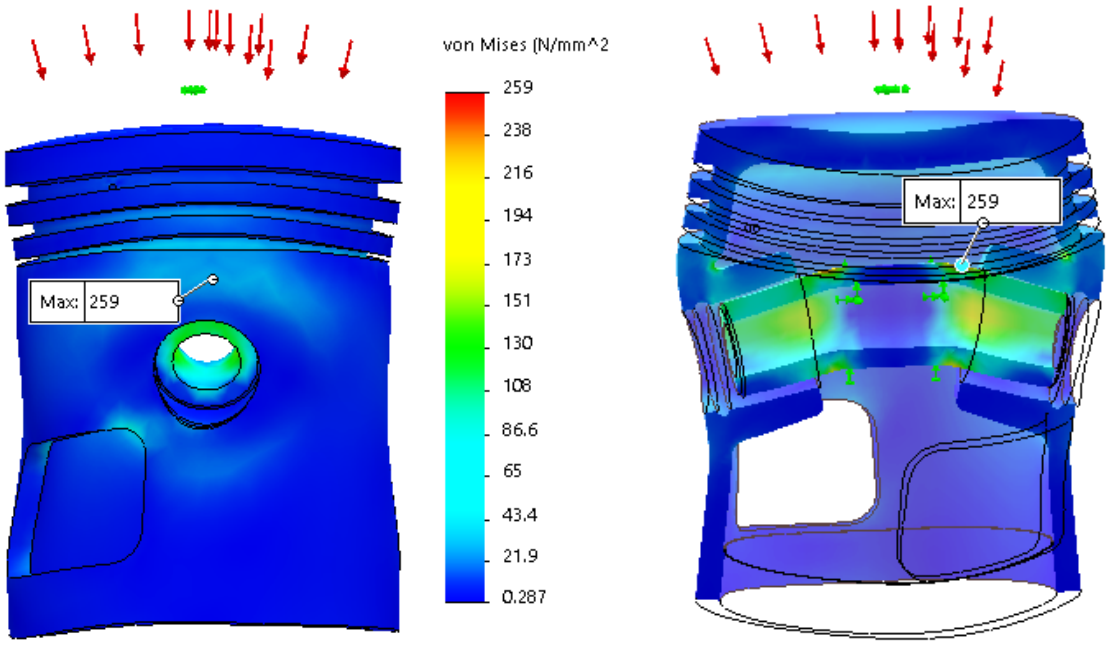


Рис. 8 – Результати моделювання напружено-деформованого стану збірки поршня з поршневим пальцем. Масштаб деформацій 200:1

Висновки. 1. Моделювання поршня ставить перед собою дві задачі – аналіз міцності і синтез бічної поверхні. І одну, і другу задачі неможливо вирішити, якщо не розуміти, як ця деталь розташована в двигуні, де і як діють навантаження, як поршень розташований в двигуні щодо оточуючих його деталей.

2. При моделюванні напружено-деформованого стану деталей важливо не тільки коректне прикладання навантажень, але і правильне закріплення. При цьому в залежності від того, як при моделювання закріплено поршень, напруження змінюються майже в 3,5 рази, причому зона максимальних напружень кожен раз різна.

3. Наглядно показано, як неналежний підхід до моделювання змінює результати моделювання, що при халатному підході як до навчального процесу, так і при реальному моделювання може привести до незрозумілих результатів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Білогуб О. В. Методика расчета переменного напряженно-деформированного состояния поршня в цикле для различных режимов работы двигателя / О. В. Білогуб, О. С. Стрибуль // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць. – Харків: ХАІ; Миколаїв: Вид-во МФ НаУКМА, 2002. – Вип. 30. Двигуни та енергоустановки. – С. 124–126.

2. Патент Российской федерации №2256897, G01M15/00. Способ оптимизации профиля боковой поверхности поршня ДВС / А. В. Белогуб. – Опубл. 20.07.2005. Бюл. № 20.

3. Белогуб А. В. Прогрессивные решения при проектировании и производстве поршней автомобильных двигателей / А. В. Белогуб, А. С. Стрибуль // Двигатели внутреннего сгорания. – 2005. – № 1. – С. 132–134.

4. Белогуб А. В. Разработка конструкции «легкого» поршня для дизелей типа Д100 /

А. В. Белогуб, Нгуен Ван Зионг, О. Ю. Линьков, С. А. Кравченко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2016. – № 1. – С. 50–55.

5. Белогуб А. В. Геометрические и силовые граничные условия при анализе напряженно-деформированного состояния поршней методом конечных элементов / А. В. Белогуб, А. А. Зотов, М. А. Максимова // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – № 2. – С. 70–74.

Білогуб Олександр Віталійович *д-р техн. наук, професор, професор кафедри конструкції авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». ORCID Author ID: 0000-0003-2801-2903, av.belogub@gmail.com.*

Марценюк Євген Вікторович *ст. викладач кафедри конструкції авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». ORCID Author ID: 0000-0002-4992-7603, y.martseniuk@khai.edu.*

Максимова Марія Олександрівна *канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри геометричного моделювання Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». ORCID Author ID: 0000-0001-6287-2750, madadiro76@gmail.com.*