

ИСПЫТАНИЯ И РАСЧЕТ УДАРНОЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КЛАПАННЫХ СТАЛЕЙ МАРОК FLAP-X И SS 716

М. В. Тофик¹, А. Лёф¹, К. Миллуорд¹, З. Гюнтер²

¹Voestalpine Precision Strip AB, Отдел исследований и разработок, г. Мункфорс, Швеция

²Nidex Global Appliance GmbH, г. Фюрстенфельдт, Австрия

Перевод с английского

М. А. Федорова

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Во время работы поршневых компрессоров пластина открывается и закрывается под действием статического перепада давления и динамического воздействия потока газа. Закрываясь, она ударяется о седло клапана, создавая напряжение и шум. Этот цикл нагрузки приводит к возникновению изгибающих и ударных усталостных напряжений в пластине. Он повторяется многократно на протяжении срока службы компрессора и определяет его ресурс и надежность. Цель этого исследования состояла в том, чтобы рассчитать ударно-усталостную прочность марок Flap-X и SS 716 и предоставить производителю компрессоров информацию, которую они могут использовать для определения марки стали, используемой в их компрессорах, для повышения их надежности. Испытания на усталостную прочность при ударных нагрузках проводились на специально изготовленной установке для испытаний на ударно-усталостную прочность, которая использовала воздушные импульсы для обеспечения движения лепестковых клапанов, изготовленных крупным европейским производителем компрессоров Nidex Global appliance GmbH, с частотой 315 Гц и продолжительностью импульса 2,2 миллисекунды. Тестирование проводилось в соответствии с методом, подробно описанным в Международном стандарте SS-ISO 12107:2012. Ударная усталостная прочность стальных клапанов Flap-X и SS 716 была рассчитана с точки зрения скорости удара в соответствии с модифицированным методом, указанным выше. Результаты испытаний и их статистический анализ показали, что ударная усталостная прочность марки Flap-X была выше по сравнению с маркой SS 716. Расчет и испытания на ударную усталостную прочность клапанных сталей могут помочь проектировщикам компрессоров выбрать оптимальный материал для своих конструкций компрессоров, чтобы повысить их надёжность. Чем выше ударная усталостная прочность стали типа Flap-X, тем более низкая частота отказов и более длительный срок службы при ударных нагрузках; это позволяет производителям компрессоров разрабатывать клапаны с более тонкими пластинами, поскольку при более тонких пластинах клапаны производят меньше шума при заданном давлении и частоте.

Ключевые слова: поршневой компрессор, пластинчатые лепестковые клапаны, ударная усталостная прочность, эксперимент, сравнительные испытания.

Перевод публикуется с разрешения авторов и оргкомитета конференции «Компрессоры и их системы» («International Conference on Compressors and their Systems») (Лондон, 2019).

Введение

Лепестковый клапан является одним из уязвимых компонентов поршневых компрессоров. Эффективность и надежность компрессоров во многом зависят от надежности клапана. Например, при увеличенной высоте подъема пластины клапана (в нашем случае — лепестка) может быть повышена энергоэффективность компрессоров. В то же время более высокий подъем лепестка, как правило, увеличивает скорость удара и усталостные напряже-

ния при ударе. Повышенные ударные усталостные напряжения в лепестковых клапанах отрицательно влияют на срок их службы при ударной усталости. Ранее такими учеными, как Свенсон [1], Дусил и Йоханссон [2] и Чай [3], было проведено несколько экспериментальных исследований по испытанию на ударную усталость различных материалов клапанов и их полезных характеристик для повышения долговечности и прочности при ударной усталости. Кроме того, во многих теоретических исследованиях, например у Пандея [4] и Бёсверф [5], представле-

Таблица 1. Номинальный химический состав испытанных марок стали (мас. %)
 Table 1. Nominal chemical composition of the tested steel grades (wt. %)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Mo	N	V	P	S
SS 716	0,38	0,45	0,55	13,5	1,00			≤0,025	≤0,015
Flap-X	0,38	0,45	0,56	13,5	1,00	+	+	≤0,025	≤0,015

Таблица 2. Механические и физические свойства сталей опытных образцов
 Table 2. Mechanical and physical properties of the tested steel grades

Марка стали	Толщина (мм)	Модуль упругости (ГПа)	Плотность (кг/м ³)	Прочность на разрыв (растяжение) (МПа)
SS 716	0,203	210–220	7700	1810±80
Flap-X	0,203	210–220	7700	2100±60

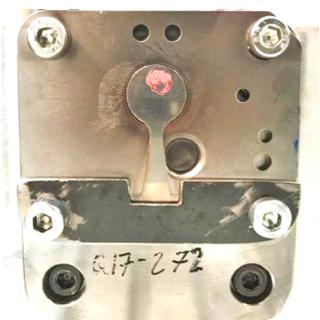


Рис. 1. Всасывающие лепестковые клапаны Nidec установлены для испытания на ударную усталость в Voestalpine Precision Strip AB. Розовая краска была нанесена на кончик язычкового клапана для эффективного отражения лазера от поверхности язычка

Fig. 1. Nidec's suction reed valves mounted in the impact fatigue test rig at Voestalpine Precision Strip AB. The pink paint was placed on the tip of the reed valve for efficient reflection of the laser from the reed surface

но динамическое поведение лепестковых клапанов. Кроме того, анализировалось ударное усталостное напряжение, возникающее из-за их ударного воздействия на седло во время работы компрессора. Предыдущее исследование, проведенное Лёфом и др. [6], показали, что лепестковые клапаны с пластинами из стали типа Flap-X имеют повышенный срок службы при ударной усталости.

Представленное в данной статье исследование представляет собой расчет и проверку ударной усталостной прочности марок стали Flap-X и SS 716, а также имеет целью предоставить производителям компрессоров информацию, которую они могут использовать для определения марки стали, используемой в их компрессорах, для повышения их надежности.

Материалы

Были исследованы две марки клапанных сталей на предмет их ударно-усталостных свойств. Марки стали Flap-X и SS 716 являются усовершенствованиями стандартной мартенситной нержавеющей стали AISI 420, их химический состав представлен в табл. 1. Марка SS 716 — это хорошо зарекомендовавшая себя клапанная сталь, которая используется в течение многих лет, в то время как Flap-X —

это последняя модернизированная версия, разработанная и произведенная компанией Voestalpine Precision Strip AB.

Испытуемые образцы представляют собой пластины из высокопрочных сталей, которые имеют в основном мартенситную микроструктуру. Их закаляют при необходимых температурах и в течение определенного времени, чтобы получить подходящее сочетание механической прочности и ударной вязкости. Механические и физические свойства всех испытанных марок стали приведены в табл. 2.

Экспериментальные испытания

Испытания на ударную усталость методом Voestalpine Precision Strip AB.

Испытания на ударную усталость проводились на специально изготовленной установке для испытаний на ударную усталость, которая использует воздушные импульсы для воздействия на лепестковые пластины клапанов и приведения их в движение. Испытательное оборудование подключено к специальному компрессору. Рабочие условия испытания, такие как рабочая частота (собственная частота лепестка клапана) и длительность импульса, могут варьироваться. Однако предпочтительно проводить испытания на собственной частоте клапанов или близко к ней, чтобы обеспечить высокие значения скорости удара и подъем лепестка клапана при приложенном давлении.

Всасывающие клапаны при поставке уже были точно приварены к седлу клапана. При монтаже клапанов основание лепестковой пластины накрывалось стальной полосой для усиления фиксации и предотвращения разрыва точечных сварных швов во время испытаний на ударную усталость (рис. 1). Для точечной маркировки лепестка, необходимой при использовании лазерного датчика движения, использовался розовый маркер.

Во время испытаний лепестки клапана неоднократно оттапливались от седла клапана с помощью импульсов давления воздуха, а затем ударяли по нему из-за упругой деформации, возникающей в них. Лазерный датчик регистрировал смещение лепестка и его частоту, в то время как пьезоэлектрический датчик регистрировал амплитуду индуцированных колебаний и их частоту в ударной пластине. Для контроля условий эксплуатации использовалось управляющее программное обеспече-

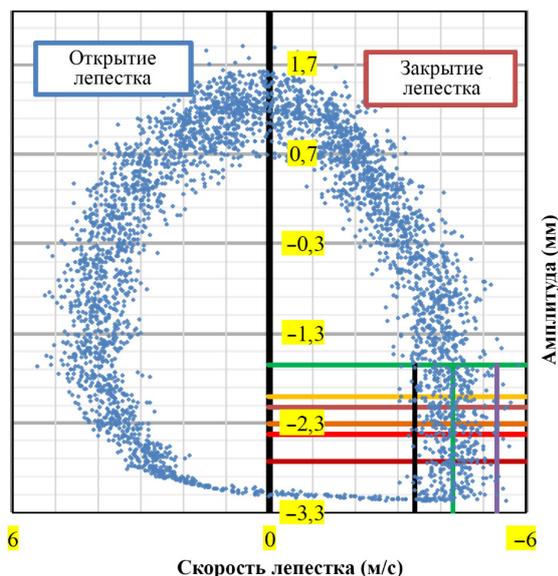


Рис. 2. При частоте 315 Гц и длительности импульса 2,2 м/с график скорости лепестка испытываемых клапанов строится в зависимости от перемещения лепестка по точкам, регистрируемым через каждые 0,1 м/с в течение 400 м/с (~126 циклов)

Fig. 2. With frequency of 315 Hz and pulse width of 2,2 ms, the reed velocity of the tested valves is plotted against the reed displacement by the data points registered after every 0,1 ms for 400 ms (~126 cycles)

Таблица 3. Матрица типов испытаний и количества образцов
Table 3. Test matrix showing the types of tests and the number of samples

Марка стали	Ступенчатые испытания	Испытания на ударно-усталостную прочность
Flap-X	15	5
SS 716	15	—

ние. Программное обеспечение также записывало амплитуду смещения, скорость удара и частоту данных о перемещении лепестка на компьютер. Однако полученные данные о скорости удара не могут быть использованы непосредственно. Поэтому эти записанные данные используются для расчета скорости лепестка и строятся в зависимости от его перемещения (рис. 2). По данным, полученным за 126 циклов, определяется средняя скорость удара в тот момент, когда клапан вот-вот ударится о седло (на рис. 2 этот интервал обозначен параллельными линиями в правой половине графика). Как пояснялось ранее, испытания на ударную усталость всасывающих лепестковых клапанов проводились с частотой 315 Гц и длительностью импульса 2,2 м/с.

Ударная усталостная прочность лепестков Flap-X и SS 716 была рассчитана с точки зрения их скорости удара при 50 миллионах циклов в качестве предела безотказной работы с использованием Международного стандарта SS-ISO 12107:2012 [7]. Было испытано 15 образцов язычковых клапанов Flap-X и SS 716 (табл. 3). В дополнение к описанным выше испытаниям для оценки среднего срока службы на усталость при ударе Flap-X класса пять образцов лепестков были испытаны при максималь-

но достижимой нормализованной скорости удара. Нормализованная скорость рассчитывается путем деления скорости испытательного удара на наблюдаемую самую высокую достижимую скорость (v/v_{max}) для конструкции клапанов Nides.

Существует два метода расчета усталостной прочности, описанных в стандарте SS-ISO 12107:2012 [7]. Стандартный метод ступенчатых испытаний для анализа данных (далее именуемый «метод 1») подсчитывает частоты отказа и безотказной работы образцов, испытанных при различных уровнях напряжения (нормализованной скорости удара). Метод 1 используется для группы выборок (неудачных или удачных) с наименьшим числом наблюдений. Модифицированный ступенчатый метод (далее именуемый «методом 2») определяет среднюю усталостную прочность путем усреднения испытательных напряжений (нормализованных скоростей удара) образцов начиная с последнего отказа и далее. Метод 2 учитывает весь испытательный образец без учета отказа или отсутствия отказа.

Испытания компрессора компанией Nides Appliances GmbH.

Эти испытания проводились в реальном компрессоре с клапанами Flap-X и SS 716. При этом изменялась не скорость удара, а рабочая частота компрессора с шагом 5 Гц. Предельный ресурс был выбран равным 5 миллионам циклов. Количество циклов, выдерживаемых клапанами, можно рассчитать по следующей формуле:

$$L(f, t) = 60 \times f \times t \times 2, \quad (1)$$

где L — количество циклов нагрузки; f — рабочая частота компрессора, Гц; t — время испытания, мин.

Компрессор работал при давлении выпуска 10,9 бар, а давление всасывания поддерживалось на уровне 1,087 бар. Температурный режим внутри компрессора составлял -10°C и 70°C . Скорости удара и подъем клапана не могли быть измерены в ходе этих испытаний.

Результаты

Результаты испытаний на ударную усталость, полученные Voestalpine Precision Strip AB.

Испытание на ударную усталость проводилось путем испытания образца на четырех различных уровнях. Предполагалось выбрать длину шага в 18% между последовательными уровнями скорости удара. Однако самый высокий уровень скорости удара, который мог быть достигнут для клапанов Secor Nides с помощью нашего оборудования для испытаний на ударную усталость, был ограничен нагрузочной способностью оборудования. Таким образом, последний шаг между самым высоким и вторым по величине уровнем напряжения составил 9% (табл. 4, 5). Предельный ресурс был выбран равным 50 миллионов циклов на основе предыдущего опыта, а также благодаря наличию испытательного оборудования. Если испытательный образец не выходил из строя за 50 миллионов циклов, то уровень скорости удара увеличивался для последующего испытательного образца, в противном случае, если он выходил из строя, то уровень скорости удара снижался для следующего образца.

Для лепестковых клапанов Flap-X только два образца вышли из строя при самом высоком уровне скорости удара. Однако скорость удара не могла быть выше определенного уровня (нормализован-

Таблица 4. Матрица испытаний, показывающая нормализованные уровни напряжений при испытании на ударную усталость лепестковых клапанов Flap-X (образцы 1–15) и испытания на ударную усталость для расчета среднего срока службы на ударную усталость (образцы 16–20). 0 — прошедший испытания тестовый образец; × — не прошедший испытания тестовый образец
 Table 4. Test matrix showing the normalized stress levels for the Flap-X reed valves (samples 1–15) and the impact fatigue testing to calculate the average impact fatigue life (samples 16–20). 0 — runout test sample; × — failed test sample

Последовательность испытаний	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Нормализованное напряжение (v/v_{max})																			
1				0	0	×		×		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,91			0				0		0											
0,73		0*																		
0,545	0*																			

ное значение напряжения 1) даже при увеличении величины приложенного давления. Поэтому успешно протестированные образцы были испытаны также и при нормализованном значении напряжения 1, поскольку ограничения испытательного оборудования не допускали скоростей выше этого для конструкции клапана Nides, ограничивая возможность оценить истинную работоспособность Flap-X.

Дальнейшие испытания на ударную усталость были проведены для того, чтобы попытаться рассчитать средний срок службы клапанов Flap-X при нормированном уровне скорости удара 1 (см. образцы 16–20 в табл. 4). Однако это не помогло, поскольку ни один из пяти испытанных образцов не вышел из строя после 100 миллионов циклов, и испытания были прерваны без сбоев.

Ни один из лепестковых клапанов SS 716 не выдержал 50 миллионов циклов без отказа при испытании при максимальном нормализованном значении напряжения 1 (табл. 5). Испытательный образец 11 вышел из строя при предполагаемом нормализованном значении напряжения 0,91.

График усталостных испытаний на рис. 3 показывает значения фактической скорости удара лепестковых клапанов марок стали Flap-X и SS 716. На этом графике показаны нормализованные значения скорости удара, рассчитанные по данным движения лепесткового клапана от лазерного датчика, как описано в пояснении к рис. 2. Можно видеть, что управление скоростью удара лепесткового клапана не является точным, так как полученные значения немного отклоняются от предполагаемых значений в табл. 4, 5. Нормализованная скорость удара может быть выше 1, так как в некоторых случаях наблюдаемая испытательная скорость удара может быть немного выше предполагаемого «самого высокого» уровня скорости удара. Для Flap-X средние испытания на усталостную прочность при ударе, проведенные при нормированной скорости удара 1, представлены образцами 16–20 на рис. 3. Для испытательного образца SS 716 11 фактическая скорость удара была немного выше, чем предполагаемая нормализованная скорость удара 0,91, и образец не прошел испытания.

Только два отказа наблюдались среди испытанных лепестковых клапанов Flap-X при нормализованной скорости удара ~1 после 21 077 463 и 8 369 089 циклов, соответственно, как показано на рис. 4. Остальные тестовые образцы не вышли из строя в течение 50 миллионов циклов. Данные испытаний показывают, что среди образцов, успешно прошедших испытание, 13 образцов, которые не показали сбоев при нормализованной скорости удара 1 и выше. Испытания, проведенные для расчета среднего срока службы при ударной усталости, не позволили сделать каких-либо обобщающих выводов, поскольку ни один из образцов Flap-X не выходил из строя до 100 миллионов циклов и более при максимально достижимом уровне нагрузки.

Все шесть лепестковых клапанов SS 716, которые были испытаны при нормализованных скоростях удара 0,98 и выше, сломались до прохождения 50 миллионов циклов (рис. 5). Образцы, которые были испытаны при нормализованных скоростях удара ниже 0,98, не выходили из строя до прохождения 50 миллионов циклов.

На рис. 6 сравнивается количество отказов клапанов Flap-X и SS 716 при максимально достижимой нормализованной скорости удара 1. Можно

Таблица 5. Матрица испытаний, показывающая нормализованные уровни напряжений для испытаний на ударную усталость лепестковых клапанов SS 716.

0 — тестовый образец, прошедший испытания; × — неудачный тестовый образец

Table 5. Test matrix showing the normalized stress levels for the staircase impact fatigue testing of the SS 716 reed valves. 0 — runout test sample; × — failed test sample

Последовательность испытаний	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Нормализованное напряжение (v/v_{max})																
1				×		×		×		×					×	
0,91			0		0		0		0		×		0			0
0,73		0*										0				
0,545	0*															

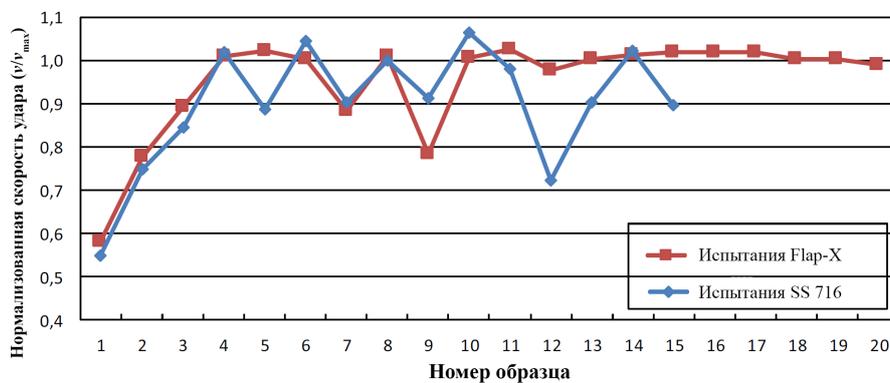


Рис. 3. Испытания на ударную усталость лепестковых клапанов Flap-X и SS 716 проводились в соответствии с методом ступенчатых испытаний (образцы 1–15).

Осредненные результаты испытания на усталостную прочность при ударе показаны на образцах 16–20

Fig. 3. Impact fatigue testing of the Flap-X and the SS 716 reed valves conducted according to the staircase test method (samples 1–15). The average impact fatigue life tests are shown by the samples 16–20

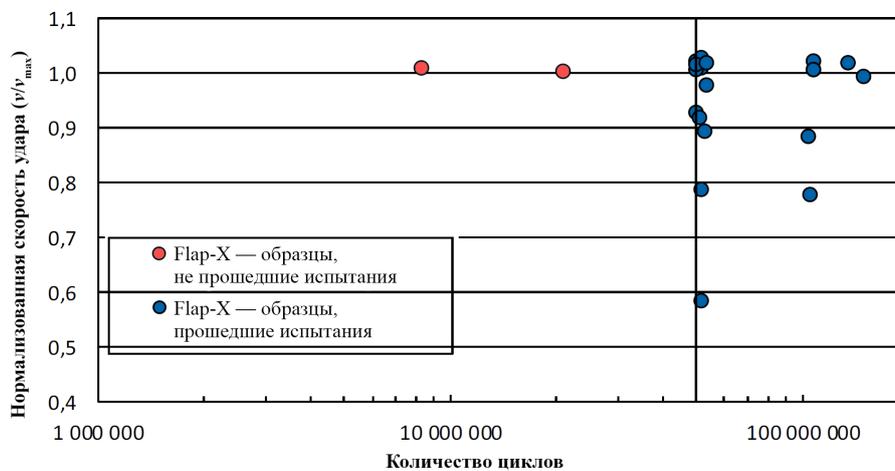


Рис. 4. Данные испытаний на ударную усталость лепестковых клапанов Flap-X с предельным ресурсом 50 миллионов циклов

Fig. 4. Impact fatigue test data of the tested Flap-X reed valves with 50 million cycles as the runout limit

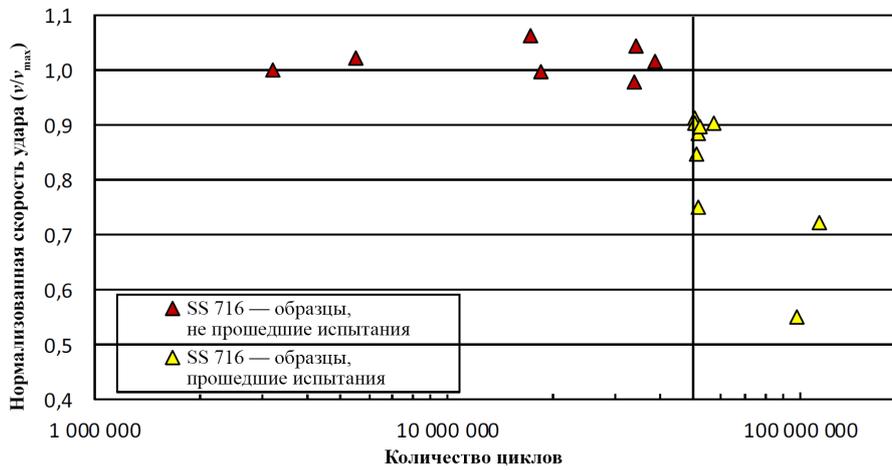


Рис. 5. Данные испытаний на ударную усталость лепестковых клапанов SS 716 с 50 миллионами циклов в качестве предельного ресурса
 Fig. 5. Impact fatigue test data of the tested SS 716 reed valves with 50 million cycles as the runout limit

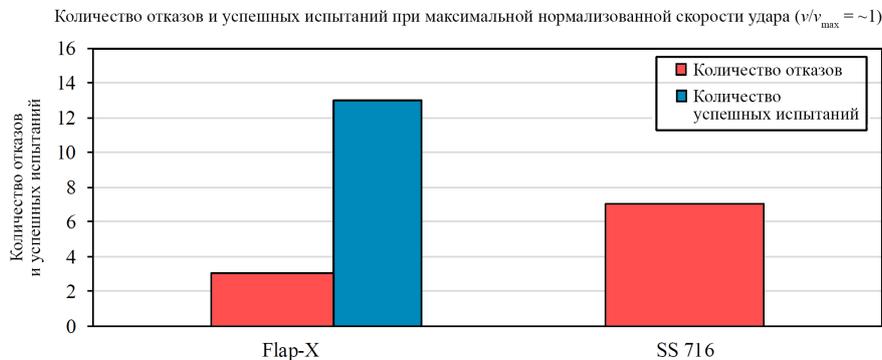


Рис. 6. Количество отказавших и прошедших испытания клапанов марок Flap-X и SS 716 при максимально достижимой нормализованной скорости удара около 1
 Fig. 6. Number of failed and runout valves of Flap-X and SS 716 grades at the highest achievable normalized impact velocity of approx. 1

увидеть, что частота отказов клапанов Flap-X была вдвое меньше, чем для класса SS 716. 15 образцов Flap-X прошли испытание на этом уровне скорости удара. С другой стороны, ни один из образцов клапанов SS 716 не прошел испытание на этом уровне скорости.

В табл. 6 приведены расчетные значения ударной усталостной прочности для марок Flap-X и SS 716 при 50% и 95% вероятности прохождения испытаний с использованием модифицированного метода ступенчатых испытаний (метод 2). Расчеты ударной усталостной прочности, приведенные в табл. 6, основаны на фактических значениях скорости удара испытанных лепестковых клапанов. Количество отказов для класса Flap-X (только 2) было недостаточным для применения метода 1, который учитывал только менее частые случаи (в данном случае отказы). Для класса SS 716 было достаточно отказов (менее частые случаи), чтобы можно было надежно оценить прочность на ударную усталость при 50% и 95% вероятности прохождения испытаний. Согласно методу 2, в котором учитывались все испытательные образцы, независимо от того, являются ли они прошедшими или не прошедшими испытание, расчетная ударная усталостная прочность Flap-X номинально была выше, чем SS 716. Ударная усталостная прочность марки SS 716, рассчитанная по

методу 1, была значительно ниже, чем по методу 2.

При построении графика подъема клапанов испытанных лепестковых клапанов в зависимости от их скоростей удара наблюдалась практически линейная зависимость (рис. 7). Чем выше подъем клапана, тем выше соответствующие скорости удара испытанных клапанов. Подъемная сила лепестковых клапанов SS 716 примерно такая же или незначительно ниже, чем у лепестковых клапанов Flap-X, в то время как их самые высокие скорости удара немного выше.

Результаты испытаний компрессора компанией Nidec Global Appliance GmbH.

Результаты испытаний компрессора приведены в табл. 7. Количество образцов и среднее, минимальное и максимальное количество циклов, выдерживаемых клапанами SS 716 и клапанами Flap-X, показаны в зависимости от рабочих частот компрессора. Предельный ресурс был установлен в 5 миллионов циклов. При частоте 105 Гц один клапан SS 716 вышел из строя, но другой прошел испытание, в то время как единственный клапан Flap-X, который был протестирован, выдержал до 5 миллионов циклов. При частоте 110 Гц были испытаны шесть клапанов каждой марки Flap-X и SS 716, но ни один из них не вышел из строя до достижения предельного ресурса. Отметим, что отказы были бо-

Таблица 6. Оценка ударной усталостной прочности при 50 миллионах циклов с использованием двух методов, описанных в шведском стандарте SS-ISO 12107:2012 [2]

Table 6. Estimated impact fatigue strength at 50 million cycles using two methods described in the Swedish Standard (SS-ISO 12107:2012) [2]

Класс (марка)	Вероятность прохождения испытания (отсутствия отказа)	Метод 1 (v/v_{max})	Метод 2 (v/v_{max})
Flap-X	50 %	нет данных	1,06
	95 %	нет данных	0,93
SS 716	50 %	0,94	1
	95 %	0,69	0,87

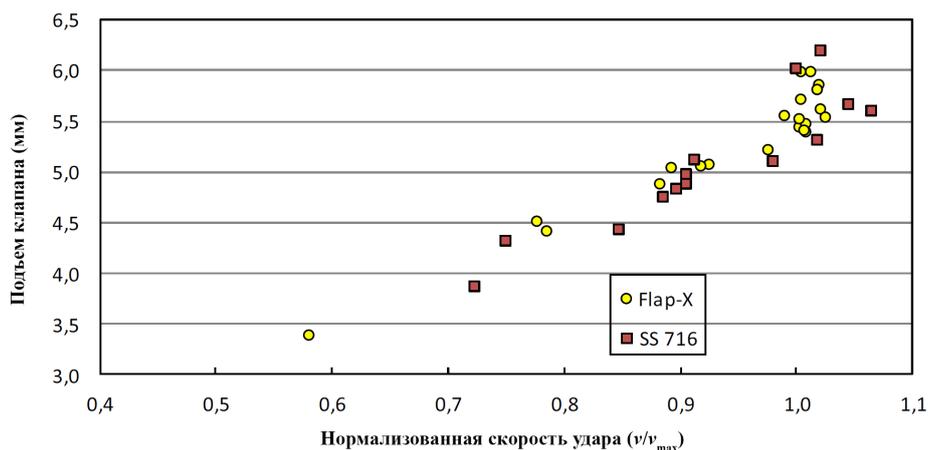


Рис. 7. Линейная зависимость между подъемной силой клапанов испытанных образцов при построении графика относительно соответствующих нормированных скоростей удара
Fig. 7. Linear relationship between the valve lift of the tested samples of the reed valves when plotted against the corresponding normalized impact velocities

лее частыми при частоте 115 Гц, и можно провести сравнение среднего срока службы клапанов Flap-X и SS 716 при ударной усталости.

При рабочей частоте компрессора 115 Гц среднее число циклов нагрузки, переносимых клапанами Flap-X, оказалось примерно на 20% выше, чем у клапанов SS716, как показано на рис. 8.

Обсуждение результатов

Стандартное ступенчатое испытание в соответствии с Международным стандартом (SS-ISO 12107:2012) [7] требует, чтобы для научно-исследовательских целей было испытано не менее 15 образцов, а для изучения надежности — не менее 30 образцов. В рамках текущего исследования, в связи с ограничениями требуемого времени испытаний и имеющейся мощности машины, в Voestalpine было проведено научное исследование путем анализа 15 тестовых образцов лепестковых клапанов, изготовленных из марок стали Flap-X и SS 716. Результаты испытаний, полученные в этом исследовании, относятся к конструкции лепестковых клапанов Nides. Проведено сравнение частоты отказов лепестковых клапанов марок Flap-X и SS 716. Оценка ударной усталостной прочности, с точки зрения скорости удара лепестковых клапанов, проводилась по полученным данным испытаний на ударную усталость. По результатам испытаний компрессоров, проведенных в Nides, количество

отказов двух марок сравнивалось при различной частоте.

Меньшее количество отказов лепестковых клапанов Flap-X, а также их более высокая ударная усталостная прочность, как показали представленные результаты испытаний на ударную усталость и испытания компрессора, обусловлены более высокой ударной усталостной прочностью материала Flap-X. Более высокая прочность на растяжение, пластичность и усталостная прочность при изгибе Flap-X и большее количество удерживаемого аустенита в его мартенситной микроструктуре приводят к большей ударной усталостной прочности лепестковых клапанов [6]. Дело в том, что некоторые из тестовых образцов Flap-X при испытаниях на нормализованных скоростях удара 1 (рис. 4) или на частоте 115 Гц (рис. 8) при испытаниях компрессора и выдерживании до предельного ресурса без отказа указывает на то, что вероятность безотказной работы лепестка Flap-X при высоких скоростях и частотах удара выше. С другой стороны, ни один из образцов марки SS 716 не выдержал испытаний при нормированной скорости удара 0,98 и выше (рис. 5), что указывает на их более низкую ударопрочность при более высоких скоростях удара. Таким образом, лепестковые клапаны Flap-X гораздо более надежны с точки зрения ударной усталости, особенно при воздействии более высоких скоростей удара.

Расчет прочности на ударную усталость, приведенной в табл. 6, при 50% и 95% вероятности про-

Таблица 7. Данные испытаний компрессора для клапанов серии Flap-X и SS 716 показывают среднее, минимальное и максимальное количество циклов нагрузки, выдерживаемых на каждой частоте
 Table 7. Compressor test data for the Flap-X and SS 716 valve series showing average, minimum and maximum number of load cycles endured at each frequency

Частота (Гц)	100 Гц			105 Гц			110 Гц			115 Гц			120 Гц		
	Пределный ресурс = 5·10 ⁶ циклов нагрузки	Кол-во испытанных образцов	Кол-во образцов, прошедших испытание	Кол-во образцов, не прошедших испытание	Кол-во испытанных образцов	Кол-во образцов, прошедших испытание	Кол-во образцов, не прошедших испытание	Кол-во испытанных образцов	Кол-во образцов, прошедших испытание	Кол-во образцов, не прошедших испытание	Кол-во испытанных образцов	Кол-во образцов, прошедших испытание	Кол-во образцов, не прошедших испытание	Кол-во образцов, прошедших испытание	Кол-во образцов, не прошедших испытание
SS 716	1	1	1	0	2	1	1	2	0	1	1	1	1	1	1
Среднее количество циклов нагрузки	-	-	5,00E+06	-	-	-	-	-	-	-	5,00E+06	-	-	3,28E+06	-
Кол-во циклов нагрузки до отказа	min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flap-X	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
Среднее количество циклов нагрузки	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,00E+06	-	-	-	-
Кол-во циклов нагрузки до отказа	min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Частота (Гц)	110 Гц			115 Гц			120 Гц			125 Гц			130 Гц		
Пределный ресурс = 5·10 ⁶ циклов нагрузки	5	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5
Среднее количество циклов нагрузки	-	5,00E+06	-	-	-	-	-	-	1,44E+06	-	-	-	-	-	-
Кол-во циклов нагрузки до отказа	min	-	-	-	-	-	-	-	4,14E+05	-	-	-	-	-	-
max	-	-	-	-	-	-	-	-	3,38E+06	-	-	-	-	-	-
Flap-X	6	6	6	0	6	6	1	6	5	1	6	5	1	6	6
Среднее количество циклов нагрузки	-	5,00E+06	-	-	-	-	5,00E+06	-	1,73E+06	-	-	-	-	4,32E+05	-
Кол-во циклов нагрузки до отказа	min	-	-	-	-	-	-	-	9,66E+05	-	-	-	-	-	-
max	-	-	-	-	-	-	-	-	2,97E+06	-	-	-	-	-	-

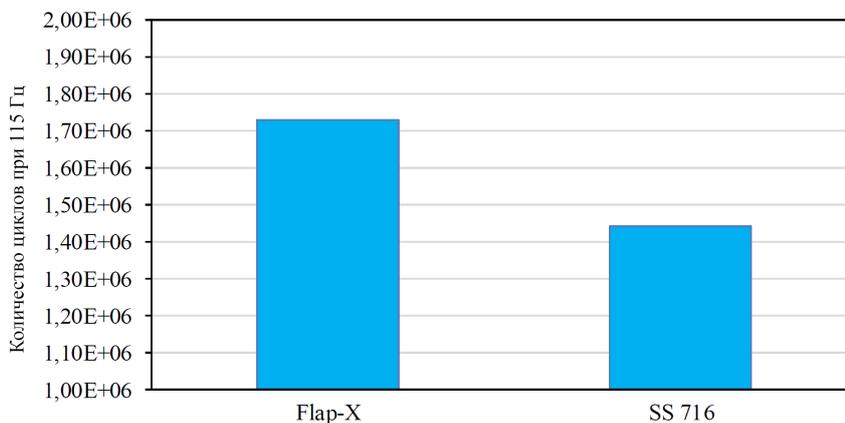


Рис. 8. Среднее количество циклов клапанов Flap-X и SS716 при испытании на частоте компрессора 115 Гц
Fig. 8. Average number of cycles endured by the Flap-X and SS716 valves when tested at compressor frequency of 115 Hz

хождения испытания в соответствии с методами, описанными в Международном стандарте (SS-ISO 12107:2012), затруднен отсутствием статистических данных, полученных в результате этого тестирования. Тестирование проводилось по стандартному методу ступенчатых испытаний (метод 1). Однако для лепестковых клапанов типа Flap-X расчет ударной усталостной прочности по методу 1 не мог быть выполнен, поскольку только 2 образца не прошли испытания. Скорость удара не могла быть сильно увеличена, чтобы вызвать больше отказов лепестковых клапанов Flap-X. С другой стороны, расчет ударной усталостной прочности для марки SS 716 был статистически достоверным, так как наблюдалось достаточное количество отказов (7 неудачных образцов). Расчет ударной усталостной прочности с использованием метода 2 был статистически достоверным для обеих марок, поскольку в нем учитывались все испытательные образцы (отказ и отсутствие отказа), хотя и обеспечивал завышенное значение для Flap-X из-за доли успешно пройденных испытаний. Было установлено, что ударная усталостная прочность для марки Flap-X по этому методу примерно на 6 % выше, чем у клапанов SS 716, даже несмотря на то, что их частота отказов была намного выше. Это связано с ограничением возможности проведения испытаний при более высоких скоростях удара, необходимых для разрушения клапанов Flap-X.

Контроль скоростей удара не был точным, так как скорости немного отличались от предполагаемых значений. Отклонение скоростей удара от предполагаемых значений может быть вызвано неточным регулированием приложенного давления, неконтролируемым изменением давления компрессора или, возможно, из-за небольших различий в изготовлении или материале лепестковых клапанов. Некоторые из образцов при испытании при одинаковых приложенных давлениях не имели одинаковых значений скорости удара и подъемной силы клапана.

Более высокие скорости удара SS 716 не означали для них более высокого подъема клапана, как показано на рис. 7. При примерно таком же давлении скорость удара лепестковых клапанов SS 716 была незначительно выше, но подъемная сила их клапанов была немного ниже. Более низкие скорости удара и более высокая подъемная сила ле-

пестковых клапанов Flap-X более предпочтительны с точки зрения надежности и эффективности компрессоров. Более низкие скорости удара означают, что лепестковые клапаны Flap-X испытывают меньшие усталостные напряжения при ударе, что, в свою очередь, может привести к увеличению срока службы этих клапанов при ударе.

Выводы

1. Частота отказов лепестковых клапанов SS 716 при испытаниях на ударную усталость значительно выше по сравнению с лепестковыми клапанами Flap-X.
2. Консервативная оценка средней ударной усталостной прочности (скорости удара) для лепестковых клапанов Flap-X была на 6% выше, чем для клапанов SS 716.
3. Испытания компрессора показали, что Flap-X выдерживал большее количество циклов по сравнению с SS 716 при рабочей частоте компрессора 115 Гц.
4. Ограничения по максимальному приложенному напряжению уменьшили количество отказов клапанов Flap-X и, следовательно, уменьшили измеренную разницу в прочности на ударную усталость между Flap-X и SS716.
5. Результаты испытаний, полученные в этом исследовании, применимы для проектирования и производства лепестковых клапанов Nidex.

Благодарности

Эта работа принадлежит компании Voestalpine Precision Strip AB, Швеция. Публикация результатов осуществляется в сотрудничестве и с разрешения Nidex Global Appliances GmbH, Австрия.

Список источников

1. Svenzon M. Impact Fatigue of Valve Steel // International Compressor Engineering Conference. 1976. Paper 172. P. 65–72.
2. Dusil R., Johansson B. Material Aspects of Impact Fatigue of Valve Steels // International Compressor Engineering Conference. 1978. Paper 254. P. 116–123.
3. Chai G. C., Zetterholm G., Walden B. Flapper Valve Steels with High Performance // International Compressor Engineering Conference. 2004. Paper 1702. C132. 8 p.

4. Pandeya P. N., Soedel W. Analysis of the Influence of Seat-Plating Or Cushioning on Valve Impact Stresses in High Speed Compressors // International Compressor Engineering Conference. 1978. Paper 263. P. 169–176.

5. Böswirth L. Hypothesis on the Failure of Spring Loaded Compressor Valve Plates // International Compressor Engineering Conference. 1980. Paper 332. P. 198–206.

6. Löf A., Millward C., Nawaz A. Flap-X: Development of a New Compressor Reed Material // International Compressor Engineering Conference. 2016. Paper 1266.

7. Svensk Standard SS-ISO 12107:2012. Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data (ISO 12107:2012, IDT).

Сведения о переводчице

ФЕДОРОВА Мария Александровна, кандидат филологических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Иностранные языки».

SPIN-код: 5636-7474; AuthorID (РИНЦ): 636900

ORCID: 0000-0002-0899-6303

AuthorID (SCOPUS): 57193409850

ResearcherID: D-7718-2014

Источник перевода:

Tofique M. W., Löf A., Millward C., Günther Z. Testing and calculation of impact fatigue strength of Flap-X and SS 716 flapper valve steel grades // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 604, no. 1. 012062. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012062.

Ссылка на полный текст статьи:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/604/1/012062/pdf>

Адрес для переписки: sidorova_ma79@mail.ru

Для цитирования

Тофик М. В., Лёф А., Миллуорд К., Гюнтер З. Испытания и расчет ударной усталостной прочности клапанных сталей марок Flap-X и SS 716 = Tofique M. W., Löf A., Millward C., Günther Z. Testing and calculation of impact fatigue strength of Flap-X and SS 716 flapper valve steel grades / пер. с англ. М. А. Федоровой // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 63–74. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-63-74.

Перевод поступил в редакцию 07.06.2021 г.

© М. В. Тофик, А. Лёф, К. Миллуорд, З. Гюнтер

TESTING AND CALCULATION OF IMPACT FATIGUE STRENGTH OF FLAP-X AND SS 716 FLAPPER VALVE STEEL GRADES

M. W. Tofique¹, A. Löf¹, C. Millward¹, Z. Günther²

¹Voestalpine Precision Strip AB, Research & Development, Munkfors, Sweden

²Nidec Global Appliance GmbH, Fürstenfeld, Austria

Translated from English

M. A. Fedorova

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

During the operation of reciprocating compressors, the flapper valve opens and closes under fluid pressure and flow. As it closes, it strikes against the valve seat, generating stresses and noise. This cycle of loading produces bending and impact fatigue stresses in the reed. This load pattern is repeated billions of times during the service life of a compressor and it defines the service life and reliability. The goal of this study was to calculate the impact fatigue strength of the Flap-X and the SS 716 grades and, to provide the compressor manufacturers with the information they can use to specify a steel grade to be used in their compressors, for reliable service. Impact fatigue tests were conducted on a custom-built impact fatigue test rig that used air pulses to produce movement of the reed valves manufactured by a major European compressor manufacturer Nidec Global appliance GmbH, at a frequency of 315 Hz and pulse width of 2,2 milliseconds. The testing was conducted according to the staircase test method detailed in the International Standard SS-ISO 12107:2012. The impact fatigue strength of the Flap-X and SS 716 steel valves was calculated in terms of the impact velocity according to the modified staircase test method in the standard. The test results and their statistical analysis showed that the impact fatigue strength of the Flap-X grade was higher compared to the SS 716 grade. The calculation and testing of the impact fatigue strength of the flapper valve steel grades could help the compressor designers to select the optimum material for their compressor designs, to provide reliable service. The higher impact fatigue strength of the Flap-X grade, lower failure rate and longer impact fatigue life will allow the compressor manufacturers to design thinner valves, as Flap-X can sustain higher impact fatigue stresses reliably for longer time and, at the same time help reduce noise, as thinner valves produce less noise for a given pressure and frequency.

Keywords: reciprocating compressor, reed valves, impact fatigue strength, experiment, comparative tests.

Printed by permission from the authors and the Centre for Compressor Technology (International Conference on Compressors and their Systems. London, 2019).

Acknowledgements

This work belongs to and is owned by Voestalpine Precision Strip AB, Sweden. The publication of results is done in collaboration with and permission of Nidec Global Appliances GmbH, Austria.

References

1. Svenzon M. Impact Fatigue of Valve Steel // International Compressor Engineering Conference. 1976. Paper 172. P. 65–72. (In Engl.).
2. Dusil R., Johansson B. Material Aspects of Impact Fatigue of Valve Steels // International Compressor Engineering Conference. 1978. Paper 254. P. 116–123. (In Engl.).
3. Chai G. C., Zetterholm G., Walden B. Flapper Valve Steels With High Performance // International Compressor Engineering Conference. 2004. Paper 1702. C132. 8 p. (In Engl.).
4. Pandeya P. N., Soedel W. Analysis of the Influence of Seat-Plating Or Cushioning on Valve Impact Stresses in High Speed Compressors // International Compressor Engineering Conference. 1978. Paper 263. P. 169–176. (In Engl.).
5. Bösirith L. Hypothesis on the Failure of Spring Loaded Compressor Valve Plates // International Compressor Engineering Conference. 1980. Paper 332. P. 198–206. (In Engl.).
6. Löf A., Millward C., Nawaz A. Flap-X: Development of a New Compressor Reed Material // International Compressor Engineering Conference. 2016. Paper 1266. (In Engl.).
7. Svensk Standard SS-ISO 12107:2012. Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data (ISO 12107:2012, IDT). (In Engl.).

About the translator

FEDOROVA Maria Aleksandrovna, Candidate of Philological Sciences, Associate Professor of Foreign Languages Department.

SPIN-code: 5636-7474

AuthorID (RSCI): 636900

ORCID: 0000-0002-0899-6303

AuthorID (SCOPUS): 57193409850

ResearcherID: D-7718-2014

Correspondence address: sidorova_ma79@mail.ru

Tofique M. W., Löf A., Millward C., Günther Z. Testing and calculation of impact fatigue strength of Flap-X and SS 716 flapper valve steel grades / trans. from Engl. M. A. Fedorova // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 63–74. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-63-74.

Received June 7, 2021.

© M. W. Tofique, A. Löf, C. Millward, Z. Günther